

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт физики высоких технологий  
Направление подготовки 12.04.02 «Опtotехника»  
Кафедра лазерной и световой техники

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

| Тема работы  |
|--|
| Формирование распределения интенсивности в системе когерентного суммирования пучков волоконных лазеров |
| УДК 621.373.826.038.825:535.41   |

Студент

| Группа | ФИО                      | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------|---------|------|
| 4ВМ5Б  | Кролевец Ольга Сергеевна |         |      |

Руководитель

| Должность                             | ФИО                      | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------------------------|--------------------------|------------------------|---------|------|
| генеральный директор ЗАО «НВП «Топаз» | Левицкий Михаил Ефимович |                        |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО                     | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|-------------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент    | Петухов Олег Николаевич | к.э.н.                 |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО                            | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|--------------------------------|------------------------|---------|------|
| Ассистент | Задорожная Татьяна Анатольевна |                        |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Зав. кафедрой | ФИО                        | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------|----------------------------|------------------------|---------|------|
| ЛИСТ          | Полисадова Елена Федоровна | к.ф.-м.н., доцент      |         |      |

Томск – 2017 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

| Код<br>результата                   | Результат обучения<br>(выпускник должен быть готов)   |
|-------------------------------------|---|
| <i>Профессиональные компетенции</i> |   |
| Р1                                  | Способность формулировать цели, задачи и составлять план научно-технического исследования в области светотехники и фотонных технологий и материалов, способность строить физические и математические модели объектов исследования и выбирать алгоритм решения задачи  |
| Р2                                  | Способность разрабатывать программы экспериментальных исследований, применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы, защищать приоритет и новизну полученных результатов исследований в области обработки, изучения и анализа фотонных материалов, корпускулярно-фотонных технологий, оптоволоконной техники и технологии, в области оптических и световых измерений, люминесцентной и абсорбционной спектроскопии, лазерной техники, лазерных технологий и оборудования, взаимодействия излучения с веществом, производства и применения светодиодов |
| Р3                                  | Способность к исследованию и анализу состояния научно-технической проблемы, технического задания, к постановке цели и задач проектирования в области светотехники, оплотехники, фотонных технологий и материалов на основе подбора и изучения литературных и патентных источников. Способностью к разработке структурных и функциональных схем оптических, оптико-электронных, светотехнических приборов, лазерных систем и комплексов с определением их физических принципов работы, структуры и технических требований на отдельные блоки и элементы  |
| Р4                                  | Способность к конструированию и проектированию отдельных узлов и блоков для осветительной, облучательной, оптико-электронной, лазерной техники, оптоволоконных, оптических, оптико-электронных, лазерных систем и комплексов различного назначения, осветительных и облучательных установок для жилых помещений, сельского хозяйства, промышленности  |
| Р5                                  | Способность к разработке и внедрению технологических процессов и режимов сборки оптических и светотехнических изделий, к разработке методов контроля качества изготовления деталей и узлов, составлению программ испытаний современных светотехнических и оптических приборов и устройств, фотонных материалов  |
| Р6                                  | Способность эксплуатировать и обслуживать современные светотехнические и оптические приборы и устройства, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды   |
| Р7                                  | Способность проявлять творческий, нестандартный подход, требующий абстрактного мышления, при решении конкретных научных, технологических и проектно-конструкторских задач в области фотонных технологий и материалов и светотехники, нести ответственность за принятые решения  |
| Р8                                  | Способность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого   |

|     |   |
|-----|---|
|     | потенциала  |
| P9  | Способность к инновационной инженерной деятельности, менеджменту в области организации освоения новых видов перспективной и конкурентоспособной оптической, оптико-электронной и световой, лазерной техники с учетом социально-экономических последствий технических решений                |
| P10 | Способностью к координации и организации работы научно-производственного коллектива, принятию исполнительских решений для комплексного решения исследовательских, проектных, производственно-технологических, инновационных задач в области светотехники и фотонных технологий и материалов |
| P11 | Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности                             |

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт физики высоких технологий  
Направление подготовки 12.04.02 «Оптотехника»  
Кафедра лазерной и световой техники

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_ Е.Ф. Полисадова

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

|                          |
|--------------------------|
| магистерской диссертации |
|--------------------------|

Студенту:

| Группа | ФИО                      |
|--------|--------------------------|
| 4ВМ5Б  | Ольге Сергеевне Кролевец |

Тема работы:

|  |  |
|--|--|
| Формирование распределения интенсивности в системе когерентного суммирования пучков волоконных лазеров |  |
| Утверждена приказом директора (дата, номер)  |  |

Срок сдачи студентом выполненной работы:

|  |  |
|--|--|
|  |  |
|--|--|

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

|  |  |
|--|--|
| <p><b>Исходные данные к работе</b><br/>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</p>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Наименование объекта исследования: распределение интенсивности лазерных пучков в системе когерентного суммирования волоконных лазеров</li> <li>• Вид лазера: волоконный лазер;</li> <li>• Требования к процессу: формирование лазерного пучка с формой распределения интенсивности, обеспечивающей условия для эффективной обработки материалов.</li> </ul>   |
| <p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b><br/>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Постановка задачи исследования;</li> <li>• Обзорная часть. Способы управления распределением интенсивности в лазерных пучках. Эффективные формы распределения интенсивности лазерного пучка для задач лазерной обработки материалов.</li> <li>• Экспериментальная часть: Формирование распределения интенсивности в системе когерентного суммирования пучков волоконных лазеров.</li> <li>• Обсуждение результатов исследования.</li> </ul> |

|  |   |
|--|---|
| <b>Перечень графического материала</b><br>(с точным указанием обязательных чертежей) | • Иллюстрации должны содержать фотоматериалы, схемы и графический материал, отражающие результаты работы. |
|--|---|

### Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

| Раздел  | Консультант  |
|---|--|
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | Петухов Олег Николаевич,<br>доцент кафедры менеджмента, к.э.н. |
| Социальная ответственность                                      | Задорожная Татьяна Анатольевна,<br>ассистент кафедры ЭБЖ       |

### Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

1 Литературный обзор  
1.1 Формы распределения интенсивности;  
1.3 Основные методы формирования заданного распределения интенсивности. Предъявляемые требования к методам;  
1.4 Реализация когерентного суммирования

|   |  |
|---|--|
| <b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b> |  |
|---|--|

### Задание выдал руководитель:

| Должность                       | ФИО          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------------------|--------------|------------------------|---------|------|
| ген.директор<br>ЗАО НВП «Топаз» | М.Е.Левицкий |                        |         |      |

### Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО          | Подпись | Дата |
|--------|--------------|---------|------|
| 4BM51  | О.С.Кролевец |         |      |

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт физики высоких технологий  
Направление подготовки 12.04.02 «Опtotехника»  
Уровень образования магистратура  
Кафедра лазерной и световой техники  
Период выполнения осенний семестр 2015 – весенний семестр 2017 гг.

Форма предоставления работы:

|                          |
|--------------------------|
| магистерская диссертация |
|--------------------------|

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Формирование распределения интенсивности в системе  
когерентного суммирования пучков волоконных лазеров

|  |  |
|--|--|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: |  |
|--|--|

| Дата контроля | Название раздела (модуля)/вид работы (исследования)   | Максимальный балл<br>раздела (модуля) |
|---------------|---|---------------------------------------|
| 15.10.15      | Постановка задачи исследования  | 10                                    |
| 01.06.16      | Обзорная часть. Способы управления распределением интенсивности в лазерных пучках. Эффективные формы распределения интенсивности лазерного пучка для задач лазерной обработки материалов. | 30                                    |
| 01.03.17      | Экспериментальная часть: Формирование распределения интенсивности в системе когерентного суммирования пучков волоконных лазеров.  | 40                                    |
| 15.05.17      | Обсуждение результатов исследования.  | 20                                    |

Составил руководитель:

| Должность                       | ФИО          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------------------|--------------|------------------------|---------|------|
| ген.директор ЗАО<br>НВП «Топаз» | М.Е.Левицкий |                        |         |      |

**СОГЛАСОВАНО:**

| Зав. кафедрой | ФИО            | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------|----------------|------------------------|---------|------|
| ЛИСТ          | Е.Ф.Полисадова | к. ф.-м. н.,<br>доцент |         |      |

# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

|               |                          |
|---------------|--------------------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>               |
| 4BM5Б         | Кролевец Ольге Сергеевне |

|                            |                     |                                  |                                      |
|----------------------------|---------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Институт</b>            | <b>ИФВТ</b>         | <b>Кафедра</b>                   | <b>«Лазерной и световой техники»</b> |
| <b>Уровень образования</b> | <b>Магистратура</b> | <b>Направление/специальность</b> | <b>12.04.02 «Оптехника»</b>          |

|   |  |
|---|--|
| <b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>   |  |
| 1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>                               | Стоимость ресурсов научного исследования (НИ) включает в себя:<br>1. Расчет оплаты труда работников;<br>2. Расчет стоимости специального оборудования.<br>3. Амортизационные отчисления.<br>4. Отчисление на социальные нужды. |
| 2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>   |  |
| 3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>  | При расчете заработной платы труда учитывались отчисления во внебюджетные страховые фонды, которые составляют 30 %.  |
| <b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>   |  |
| 1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>  | Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения   |
| 2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>   | Не разрабатывается   |
| 3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>  | Расчет рисков исследования, составление календарного плана проекта, маркировка контрольных событий и строительство иерархии структуры работ  |
| 4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>  | В ходе исследования была проведена относительная и абсолютная оценка эффективности исследования  |
| <b>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):</b>  |  |
| 1. <i>Сегментирование рынка</i><br>2. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i><br>3. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</i> |  |

|   |  |
|---|--|
| <b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b> |  |
|---|--|

**Задание выдал консультант:**

|                            |                         |                               |                |             |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Должность</b>           | <b>ФИО</b>              | <b>Ученая степень, звание</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| Доцент кафедры менеджмента | Петухов Олег Николаевич | к.э.н., доцент                |                |             |

**Задание принял к исполнению студент:**

|               |                          |                |             |
|---------------|--------------------------|----------------|-------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>               | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| 4BM5Б         | Кролевец Ольга Сергеевна |                |             |

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

| Группа | ФИО                      |
|--------|--------------------------|
| 4ВМ5Б  | Кролевец Ольге Сергеевне |

| Институт            | ИФВТ         | Кафедра                   | «Лазерной и световой техники» |
|---------------------|--------------|---------------------------|-------------------------------|
| Уровень образования | Магистратура | Направление/специальность | 12.04.02 «Опtotехника»        |

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

|   |   |
|---|---|
| <p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p> | <p>Объект исследования: приборы и оборудование, исследуемый лазерный пучок. Волоконный лазер мощностью 150 мВт и с длиной волны 1064 нм. На основе полученного лазерного пучка будет получена лазерная технологическая систем на основе метода когерентного суммирования пучков волоконных лазеров для дистанционной (1 ÷ 10 м) резки и сварки металлов. Мощность базовой модели 0,5 – 1 кВт с возможностью дальнейшего масштабирования мощности.</p> |
|---|---|

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

|   |   |
|---|---|
| <p>1. Производственная безопасность<br/>1.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований</p> | <p>Вредные факторы:<br/>- повышенный уровень шума на рабочем месте;<br/>- недостаточная освещенность рабочей зоны;<br/>- отклонение показателей микроклимата в помещении;<br/>- нервно-психические перегрузки;<br/>- повышенный уровень электромагнитных излучений<br/>Средства защиты:<br/>противошумные наушники; противошумные вкладыши; звукоизолирующие кожухи; рационализация режимов труда и отдыха; замена ламп; установка дополнительного освещения; уборка; проветривание; обогрев помещения; перерывы в работе; отдых; защитные очки<br/>Опасные факторы:<br/>- электрический ток.<br/>Средства защиты: зануление, заземление, изоляция токопроводящих частей, предупреждающие плакаты и знаки, диэлектрические коврики, защитное отключение</p> |
| <p>2. Экологическая безопасность</p>  | <p>Утилизация и переработка металла; вторичное использование отработанных ресурсов; отправка отходов на специальные</p>   |



|   |  |
|---|--|
|   | полигоны для захоронения; загрязнение твердыми бытовыми отходами; загрязнение парами ртути.  |
| 3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях  | Техногенные:<br>Пожар (взрыв).<br>Соблюдения всех стандартов, своевременный ремонт и проверка электрооборудования, а также соблюдение правил пожарной безопасности.<br>Мероприятия, проводимые для предотвращения возникновения пожара |
| 4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:<br>4.1. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны | Размещение лазерных изделий;<br>Требования к организации рабочих мест;<br>Требования к помещениям  |

|   |  |
|---|--|
| <b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b> |  |
|---|--|

**Задание выдал консультант:**

| Должность   | ФИО                            | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---|--------------------------------|------------------------|---------|------|
| Ассистент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности | Задорожная Татьяна Анатольевна |                        |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                      | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------|---------|------|
| 4ВМ5Б  | Кролевец Ольга Сергеевна |         |      |

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 118 с., 4 ч., 33 рис., 25 табл., 29 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: когерентное суммирование, лазерный пучок, объединение пучков, волоконный лазер, распределение интенсивности, дифракционное ограничение, максимум интенсивности, гауссов пучок, бесселев пучок, оптический вихревой пучок.

Объектом исследования являются формы распределения интенсивности лазерных пучков в системе когерентного суммирования пучков волоконных лазеров, в том числе оптических вихревых пучков.

Цель работы: исследование возможностей создания оптических вихревых пучков, обладающих нулевой интенсивностью в центре пучка, используя методы фазирования пучков, которые применяются в задачах когерентного суммирования лазерных пучков.

В процессе работы проводились изучение наиболее распространенных форм распределения интенсивности пучков и способы их реализации, а также экспериментальное исследование возможности формирования скалярных оптических вихревых пучков в системе когерентного суммирования пучков волоконных лазеров.

В результате экспериментального исследования в системе когерентного сложения пучков были сформированы оптические вихревые пучки с дислокацией в центре (на оси) с топологическим зарядом  $l=1$  и  $l=2$ , которые могут использоваться в частности для задач беспроводной оптической связи.

Область применения: лазерная обработка материалов, беспроводная передача энергии, беспроводная оптическая связь.

В будущем планируется изучение характеристик и свойств оптических вихревых пучков с практической точки зрения.

## Сокращения

МОРА – master oscillator power amplifier – задающий генератор усилитель мощности;

ОНД – optical heterodyne detection – оптическое гетеродинное детектирование;

SPGD - stochastic parallel gradient descent – стохастический параллельный градиентный спуск;

АОМ – акустооптический модулятор;

ДВФ – датчик волнового фронта;

ДПИ – допустимые пределы излучения;

ЛИ – лазерное излучение;

ОУМ – орбитальный угловой момент;

ПЗС – прибор с зарядовой связью;

ПК – персональный компьютер;

ПО – программное обеспечение;

ЭМП – электромагнитное поле;

ЭОМ – электрооптический модулятор.

## Оглавление

|   |    |
|---|----|
| Введение.....   | 14 |
| 1 Обзор литературы .....  | 16 |
| 1.1 Формы распределения интенсивности .....   | 16 |
| 1.1.1 Гауссовы пучки .....  | 17 |
| 1.1.2 «Top-hat» пучки.....  | 19 |
| 1.1.3 Бесселевы и кольцевые пучки .....   | 19 |
| 1.1.4 Оптические вихревые пучки.....  | 22 |
| 1.2 Понятие когерентности. Интерференция света .....                                      | 25 |
| 1.3 Основные методы сложения лазерных пучков.....   | 28 |
| 1.4 Реализация когерентного суммирования.....   | 31 |
| 1.5 Экспериментальные методы регистрации параметров распределения<br>лазерных пучков..... | 39 |
| 2 Экспериментальная установка.....  | 43 |
| 2.1 Описание экспериментальной установки.....   | 43 |
| 2.2 Методы настройки системы.....   | 46 |
| 2.3 Используемое оборудование .....   | 47 |
| 2.3 Результаты экспериментальных исследований .....                                       | 50 |
| 2.3.1 Результаты эксперимента по когерентному сложению пучков. ....                       | 50 |
| 2.3.2 Результаты эксперимента по формированию оптических вихревых<br>пучков.....          | 55 |
| Выводы по полученным результатам: .....   | 60 |
| 3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....                   | 61 |
| 3.1 Предпроектный анализ .....  | 61 |
| 3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....                            | 61 |

|  |    |
|--|----|
| 3.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции<br>ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....                | 62 |
| 3.1.3 SWOT-анализ .....  | 63 |
| 3.1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации .....  | 65 |
| 3.2 Инициация проекта .....  | 66 |
| 3.3 Планирование управления научно-техническим проектом .....  | 68 |
| 3.4. Бюджет научного исследования .....  | 71 |
| 3.5 Реестр рисков проекта .....  | 73 |
| 3.6 Определение ресурсной эффективности исследования .....   | 74 |
| 4 Социальная ответственность .....   | 75 |
| Введение .....   | 75 |
| 4.1. Производственная безопасность .....   | 76 |
| 4.1.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на<br>рабочем месте при проведении исследований ..... | 76 |
| 4.2. Экологическая безопасность .....  | 87 |
| 4.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....   | 88 |
| 4.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....   | 90 |
| 4.4.1 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны .....  | 90 |
| Заключение .....   | 92 |
| Список публикаций .....  | 95 |
| Список используемых источников .....   | 96 |
| Приложение 1 .....   | 99 |

## Введение

Возможность создания лазерных пучков с управляемыми пространственными характеристиками, такими как распределение интенсивности в заданной точке пространства, имеет важное значение при решении многих задач в области обработки материалов, беспроводной оптической связи, для научных исследований. Как правило, лазерные пучки характеризуются гауссовым профилем интенсивности (для одномодовых лазеров) или сложным неконтролируемым распределением (для многомодовых пучков). Для получения других распределений используются сложные оптические системы, дифракционные оптические элементы, фазовые пластинки, пространственные модуляторы света. При этом возможности управления распределением интенсивности в рамках одного устройства или в режиме реального времени крайне ограничены. Данная работа направлена на исследование принципа фазового управления распределением интенсивности при сложении в дальней зоне гауссовых пучков, формируемых решеткой волоконных лазеров. В частности исследуется задача формирования данным способом оптических вихревых пучков.

Кроме того, формирование дифракционного пучка в волоконных лазерах представляет определенные трудности при высоких мощностях излучения, вследствие этого возникают нелинейные эффекты, которые приводят к разрушению волокна. Еще одной проблемой лазеров с высокой мощностью является использование фокусирующих головок с коротким рабочим расстоянием, что приводит к выходу из строя фокусирующей оптики. Такие лазеры имеют большую расходимость излучения, это является ограничением при обработке металлов толщиной более 1 см. В системах когерентного суммирования такие проблемы отсутствуют, за счет генерации высоких плотностей мощности при малых суммарных мощностях излучения.

Объектом исследования данной работы являются формы распределения интенсивности лазерных пучков в системе когерентного суммирования воло-

конных лазеров, в том числе оптических вихревых пучков, обладающих нулевой интенсивностью в центре пучка.

В процессе работы были изучены наиболее распространенные формы распределения интенсивности пучков и способы их реализации. Так же было проведено экспериментальное исследование возможности формирования скалярных оптических вихревых пучков в системе когерентного суммирования пучков волоконных лазеров. В результате были сформированы оптические вихревые пучки, которые обладают орбитальным угловым моментом (ОУМ) с топологическим зарядом  $l=1$  и  $l=2$ .

Полученные оптические вихревые пучки могут быть использованы для задач беспроводной оптической связи и передачи энергии, а также при лазерной обработке материалов.

Данная разработка системы формирования лазерных пучков методом когерентного суммирования пучков волоконных лазеров является частью проекта по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.613.21.0035 с Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы».

Также была опубликована статья «Экспериментальная установка для формирования распределения интенсивности с помощью управления фазами в многоканальной системе волоконных лазеров» в сборнике научных трудов VI Международной конференции по фотонике и информационной оптике, которая проходила 1-3 Февраля 2017 в г.Москве в НИЯУ МИФИ.

Планируется участи в XIII Международной конференции по импульсным лазерам и применениям лазеров AMPL-2017 10-15 сентября 2017 года в г. Томске, с темой доклада «Экспериментальное исследование возможности формирования лазерного пучка, обладающего орбитальным угловым моментом в системе когерентного сложения пучков волоконных лазеров».

## 1 Обзор литературы

### 1.1 Формы распределения интенсивности

Типичные параметры лазеров, которые контролируются для обработки материалов – это энергия, плотность мощности, размер пятна, длина волны, поляризация и, в случае импульсных лазеров, длительность импульса и частота повторения. Роль этих параметров на результирующие структуры и свойства пучков широко изучены, как экспериментально, так и теоретически [1, 2, 3]. Знание этих параметров имеет важное значение для определения оптимальных условий при различных применениях лазерных пучков. Например, поток энергии лазера может повлиять на размер зерна поликристаллического кремния (poly - Si), полученного посредством лазерного отжига аморфного кремния. Этот фактор может существенно повлиять на производительность поликристаллических устройств, таких как тонкие пленочные транзисторы. Результат воздействия на биологические ткани зависит от длины волны лазерного излучения (ЛИ), которая в свою очередь влияет на результативность хирургических методов. Поляризация пучка может влиять на поглощение в данном материале, что сказывается на результирующей структуре материала (при лазерной резки или сварке). Скорость, с которой энергия доставляется к материалу, также влияет на процесс модификации. В частности, длительность импульса излучения лазера может оказать значительное влияние на динамику удаления материала. Это приводит к более быстрому выбросу материала с меньшей зоной термического влияния, когда длительность импульса сокращается.

Контроль и влияние других параметров лазеров еще менее изучены, но они также являются важными факторами при обработке материалов или передаче энергии. Одним из них является форма распределения интенсивности лазерного пучка, она определяется как распределение интенсивности излучения света, когда пучок достигает материала (мишени). Рассмотрим типичные формы распределения интенсивности.



### 1.1.1 Гауссовы пучки

На сегодняшний день гауссовы пучки являются наиболее распространенной формой распределения, используемого при обработке материалов. Распространение гауссова пучка через тонкую линзу математически описывается преобразованием Фурье и в результате этого преобразования на выходе имеем гауссов пучок (рис. 1.1). Это особенно важно в области лазерной обработки, где несколько оптических элементов направляют лазерное излучение к обрабатываемой поверхности.

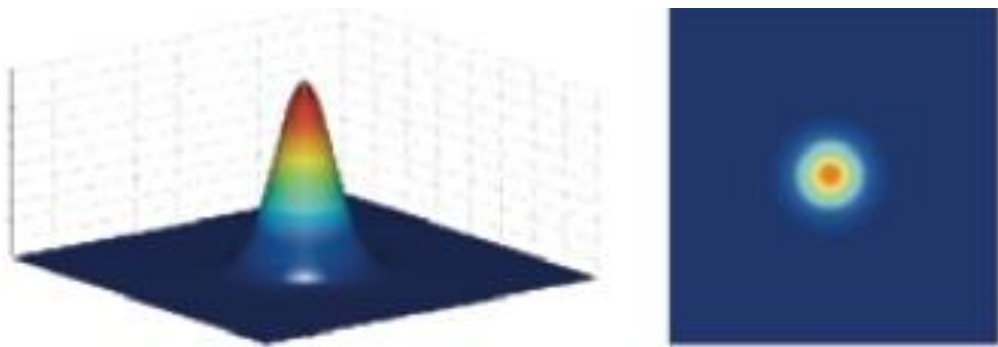


Рисунок 1.1 – Гауссов пучок[4]

Пространственная структура интенсивности излучения таких лазеров с достаточной степенью точности описывается функцией распределения Гаусса [4]:

$$I(r, \theta) = I_0 \exp\left(-2 \frac{(r - r_c)^2}{\omega^2}\right) \quad (1.1)$$

где  $I_0$  – максимальная интенсивность пучка;

$r_c$  – координата точки с максимальной интенсивностью;

$\omega$  – поперечный размер пучка в области перетяжки.

Важным свойством гауссовых пучков является их малая расходимость, что позволяет фокусировать их с помощью оптической системы в пятно малого размера:

$$d_f^G = 1.26 \frac{\lambda}{d} F \quad (1.2)$$

где  $F$  – фокусное расстояние линзы;

$d$  – диаметр пучка в плоскости линзы;

$\lambda$  – длина волны излучения.

Гауссово распределение интенсивности лазерного пучка образуется непосредственно в результате формирования основной поперечной электромагнитной моды ( $TEM_{00}$ ) в лазерном резонаторе и не требует специальных методов формирования лазерного пучка.

Качество пучка  $M^2$  ( $M^2 \geq 1$ ) определяет требования, при которых реальный пучок близок к идеальному гауссовому пучку ( $M^2 = 1$ ). Этот параметр оценивает способность лазерного пучка к острой фокусировке для конкретного лазера, так как в действительности пространственная структура излучения отличается от гауссового распределения.

Важным свойством гауссовых пучков для обработки материалов является их низкая расходимость, которая позволяет сфокусировать небольшое пятно. При фокусировке гауссова пучка в воздухе с помощью линзы с заданной числовой апертурой  $NA$ , диаметр пучка в фокусе ( $d_f$ ) можно выразить как [4]:

$$d_f \approx 2 \frac{\lambda}{\pi} \frac{M^2}{NA} \quad (1.3)$$

Еще одним важным параметром в лазерной обработке материалов является глубина резкости  $z_f$ , которая связана с расходимостью луча. При обработке материалов, предполагается, что это расстояние до заготовки, которое может быть перемещено дальше от перетяжки пучка, сохраняя при этом размер фокального пучка. Так же называют рэлеевской длиной,  $z_r$  [4]:

$$z_f = z_r \approx \frac{\pi}{4\lambda} \frac{d_f^2}{M^2} \quad (1.4)$$

Рэлеевская длина представляет собой расстояние от перетяжки пучка вдоль направления распространения, при котором луч удваивает свою площадь поперечного сечения.

### 1.1.2 «Top-hat» пучки

Распределение интенсивности с плоской вершиной или «Top-hat» пучки также широко используются для обработки материалов (рис. 1.2). Благодаря высокой степени однородности, такие пучки показывают высокую эффективность в задачах лазерной абляции (например, при производстве полупроводниковых компонентов), лазерного отжига, нанесения и травления тонких пленок, упрочнения материалов и высококачественной сварки и др.

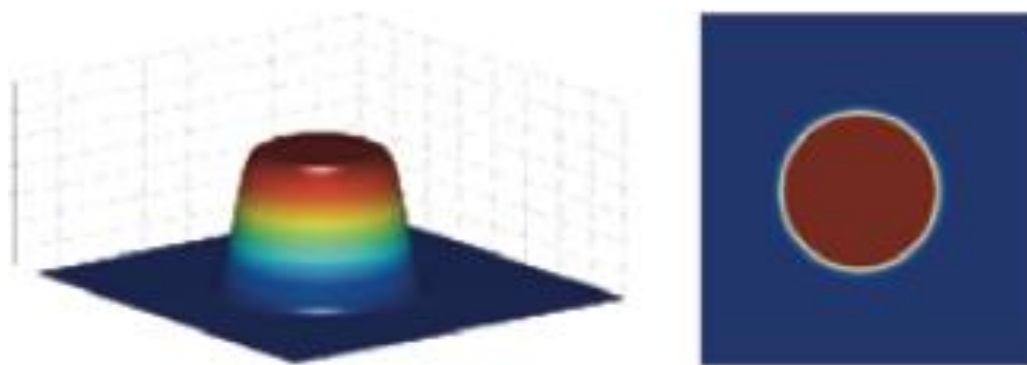


Рисунок 1.2 – «Top-hat» пучок [4]

Одной из главных проблем, связанных с «Top-hat» пучками является то, что в отличие от Гауссовых пучков, они не сохраняют свою форму при их распространении, и таким образом равномерное распределение интенсивности формируются вблизи фокальной плоскости или плоскости изображения оптической системы. За пределами этой зоны, профиль пучка и изменение качества, может привести к неравномерной обработке и к побочным эффектам [4].

### 1.1.3 Бесселевы и кольцевые пучки

Пучка Бесселя представляет собой пучок, у которого электрическое поле описывается нулевым порядком функции Бесселя первого рода  $J_0$ :

$$E(r, \varphi, z) = A_0 \exp(ik_z z) J_0(k_r r) \quad (1.5)$$

где  $r$  и  $\varphi$  - это поперечные и полярные координаты;

$z$  - это координата в направлении распространения;

$k_z$  и  $k_r$  - продольный и радиальный волновые вектора.

В более общем смысле, термин пучка Бесселя может ссылаться на функции высшего порядка, хотя здесь это игнорируется. Так как интенсивность луча пропорциональна квадрату напряженности электрического поля для пучка Бесселя [4].

$$I(r, \varphi, z) \propto J_0^2(k_r r) \quad (1.6)$$

Этот пучок не появляется одним пятном, а представляет собой серию концентрических колец (рис. 1.3).

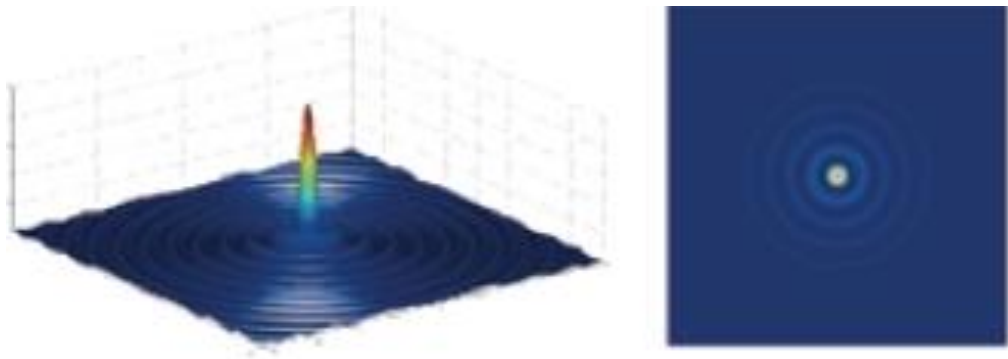


Рисунок 1.3 – Пучок Бесселя [4]

Согласно ур. 1.6, количество колец Бесселева пучка должно быть бесконечно, однако, в лабораторных условиях генерация Бесселевых пучков из-за наличия конечных апертур производит Бесселевы пучки с конечными размерами. Важно отметить, что в дальнем поле, также разделение волновых векторов увеличивается, интенсивность пучков в центральной оси уменьшается и, в конечном счете, достигает нулевого значения, это соответствует кольцевому пучку [4].

Кольцевой пучок представляет собой пучок с распределением интенсивности, сосредоточенном не на оси интенсивности, а в кольце, как представлено на рис. 1.4. Существует несколько видов кольцевых пучков в зависимости от распределения интенсивности излучения внутри кольцевого пространства.

Кольцевой пучок может быть образован также путем вычитания двух Гауссовых пучков с той же максимальной интенсивностью, но с другой каустикой пучка. В этом случае результирующая интенсивность пучка будет:

$$I(r, \theta) = I_0 \left[ \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_1^2}\right) - \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_2^2}\right) \right] \quad (1.7)$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  - соответствуют каустике пучка от двух Гауссовых пучков [4].

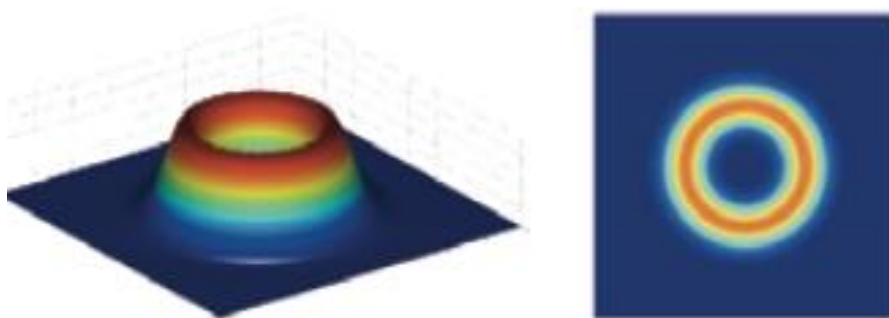


Рисунок 1.4 – Кольцевой пучок [4]

Пожалуй, самым важным оптическим свойством для обработки материалов является протяженность глубины резкости Бесселевых пучков. Этот «бездифракционный» эффект возникает в результате минимального расплывания в центральной части пучка при распространении волны.

Другой важной особенностью бесселевых пучков является значительно большая, по сравнению с гауссовыми пучками, глубина поля. В действительности, Рэлеевскую длину для Бесселева пучка можно аппроксимировать как:

$$z_{Bessel} \approx \frac{\pi D d_f}{4\lambda} \quad (1.8)$$

где  $D$  – диаметр апертуры;

$d_f$  – диаметр центрального лепестка;

$\lambda$  – длина волны лазерного излучения.

Издержками этого увеличения глубины резкости является то, что оптическая энергия распределяется между кольцами в картине и собственный бездифракционный пучок Бесселя достигается за счет мощности и контраста.

Следующее оптическое свойство Бесселевых пучков, это их способность восстановления после препятствия, которое обычно называют «эффект самоисцеления». Это можно понять, рассматривая построение Бесселева пучка в виде суперпозиции плоских волн, распространяющихся по конусу. Таким образом,

если помеха находится в центре пучка, она будет блокировать некоторые пучки, а остальные будут опять интерферировать после препятствия. Это уникальное свойство может способствовать смягчению последствий от обломков и других продуктов лазерной обработки, что может частично блокировать случайные пучки. С обычными пучками, такая блокировка может привести к неоднородностям при обработке.

Для формирования бесселевых пучков применяются рефракционные оптические схемы с использованием аксиконов, дифракционные и голографические элементы оптические фазовые пластинки и фазовые маски, волоконно-оптические элементы, а также пространственные модуляторы света.

Более подробно методы получения и применение бесселевых пучков описаны в обзорных статьях [4] и [5].

#### 1.1.4 Оптические вихревые пучки

Родственными по структуре с кольцевым пучком [1, 2] существует так называемый ОВ пучок. ОВ пучок определяется, как пучок, чья фаза изменяется азимутально вдоль направления распространения. ОВ пучок характеризуется топологическим зарядом  $l$ , который соответствует числу поворотов в фазовом фронте в пределах одной длины волны. За счет вращения фазового фронта, фаза в центре пучка имеет множественное значение, что приводит к разрыву фазы (сингулярности), которая производит исчезающие амплитуды в этой точке, создавая нулевую интенсивность на оси.

Рассмотрим радиальную лазерную решетку, состоящую из  $N$  идентичных элементарных гауссовых пучков, которые расположены симметрично по кольцу радиуса  $\rho$ , как показано на рис. 1.5 а. Предполагается, что каждый элементарный пучок имеет симметричную каустику и разные начальные фазы, и координаты смещения центра каждого элементарного пучка составляют

$(\rho \cdot \cos \theta_j, \rho \cdot \sin \theta_j)$ , где  $\theta_j = \frac{\pi \cdot (2j-1)}{N}$  азимутальный угол  $j$ -го элементарного

пучка,  $\rho$  контролирует разделение расстояния  $d$  между этими элементарными пучками. Решетка исходного пучка расположена на входной плоскости  $z = 0$ , и проходит через аксиально-симметричную оптическую систему (рис. 1.5 б) [6].

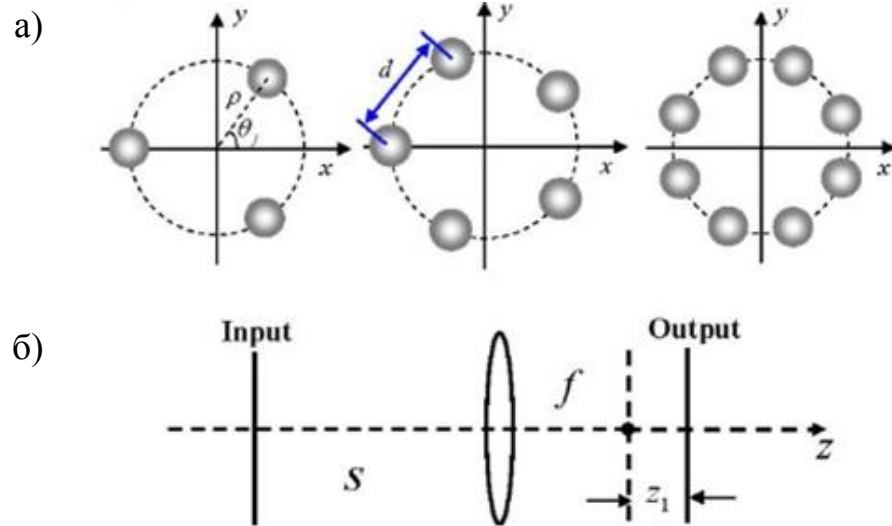


Рисунок 1.5 – Схема радиальной лазерной решётки с тремя, пятью и восьмью гауссовыми пучками (а), схема фокусировки линзовой оптической системы (б) [6]

Все элементарные пучки имеют когерентную суперпозицию, и при распространении каждый элементарный пучок будет интерферировать друг с другом, что приводит к новым свойствам: темновая интенсивность в центре, вращение результирующего пучка и спиральная фазовая структура.

Положение вихря в распределении интенсивности можно наблюдать путем изучения структуры фаз следующим образом: изменение от  $0$  до  $2\pi$  вокруг точки указывает на винтовой тип вихря, и фаза, перекрывающейся линии, указывает на краевую дислокацию.

Рассмотрим особенности распространения синтезированных вихревых пучков на основе сравнения с характеристиками поля лаггерр-гауссова пучка  $LG_m^l$  [7]:

$$E(r, \varphi, z = 0) = \left( \sqrt{2} \frac{r}{a} \right)^l L_m^l \left( \frac{2r^2}{a^2} \right) \exp \left( -\frac{r^2}{a^2} \right) \exp(il\varphi) \quad (1.9)$$

где  $r$  и  $\varphi$  – полярные координаты;

$a$  – радиус пучка;

$m$  – радиальный индекс моды ( $m = 0$ );

$l$  – значение топологического заряда.

поле синтезированного вихревого пучка представляет собой сумму полей на  $N_a$  субапертурах матрицы волоконных лазеров:

$$E(x, y, z=0) = \sum_{sub=1}^{N_a} E_{sub}(x, y, z=0) \quad (1.10)$$

В случае гексагональной упаковки субпучков отсутствует центральный субпучок.

Распределения амплитуды и фазы поля такого пучка для топологического заряда  $l = 3$  представлены на рис. 1.6. Видно, что число субапертур, составляющих синтезированный вихревой пучок, аналогичный непрерывному лаггерр-гауссову пучку, определяет радиус отдельной субапертуры. Кроме того, при таком способе формирования вихревого пучка, очевидно, что число субапертур также определяет максимально возможное значение топологического заряда [7].

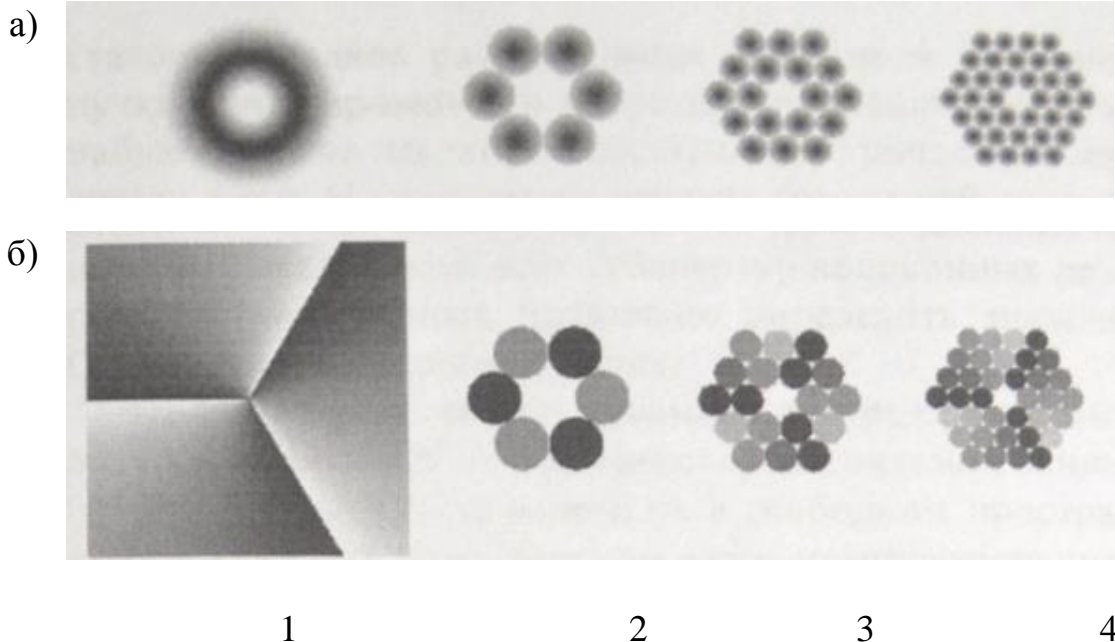


Рисунок 1.6 – Распределения амплитуд (а) и фаз (б) полей лаггерр-гауссова (1) и синтезированного (2 - 4) вихревых пучков с топологическим зарядом  $l = 3$ .



Оптические вихревые пучки могут быть получены несколькими методами – это спектральное, некогерентное и когерентное суммирование пучков. В нашей работе используется метод когерентного суммирования пучков, который основан на эффекте интерференции. Поэтому в следующем подразделе рассмотрим более подробно понятия когерентности и интерференции.

## 1.2 Понятие когерентности. Интерференция света

Для подробного изучения данного подраздела были использованы следующие источники: Аксенов В.В. «Оптика, атомная и квантовая физика» [8], Ландсберг Г.С. «Оптика» [9].

Интерференция света - это явление перераспределения в пространстве световой энергии с образованием устойчивой во времени интерференционной картины чередования максимумов ( $I_{max}$ ) и минимумов ( $I_{min}$ ) интенсивности света при наложении двух или более когерентных волн.

Два источника называются когерентными, если они имеют одинаковую частоту и постоянную, не зависящую от времени разность фаз. Волны, возбуждаемые такими источниками, также называются когерентными.

При исследовании интерференции волн, определяют разность фаз в точке их наложения. Рассмотрим две когерентные волны, распространяющихся вдоль оси  $Ox$ , которые имеют одинаковые частоту  $\omega$  и амплитуду  $A_0$ , вдоль оси  $Oy$  имеют одинаковое направление колебаний векторов  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$ :

$$\begin{aligned} E_{1y} &= E_0 \cos(\omega t - k_1 x_1 + \alpha_1) = E_0 \cos \Phi_1; \\ E_{2y} &= E_0 \cos(\omega t - k_2 x_2 + \alpha_2) = E_0 \cos \Phi_2. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Согласно принципу суперпозиции, если две волны накладываются друг на друга в определённой области пространства, то они порождают новый волновой процесс. При этом напряженность результирующего поля в любой точке данной области равно их сумме:

$$\begin{aligned}
E_y &= E_{1y} + E_{2y} = \\
&= 2E_0 \cos\left(\frac{k_2 x_2 - k_1 x_1}{2} + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) \cos\left(\omega t - \frac{k_2 x_2 + k_1 x_1}{2} + \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{2}\right) = \quad (1.12) \\
&= E_m \cos(\omega t + \alpha)
\end{aligned}$$

Учтем, что волновые числа равняются:

$$\begin{aligned}
k_1 &= \frac{2\pi}{\lambda_1} = \frac{2\pi n_1}{\lambda}; \\
k_2 &= \frac{2\pi}{\lambda_2} = \frac{2\pi n_2}{\lambda}
\end{aligned}$$

где  $\lambda$  - длина волны в вакууме;

$n_1$  и  $n_2$  - показатели преломления сред, в которых распространяются волны.

Амплитуда суммарной волны будет равна:

$$E_m = \left| 2E_0 \cos\left(\frac{\pi\Delta}{\lambda} + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) \right| = |2E_0 \cos(\Phi_2 - \Phi_1)| \quad (1.13)$$

где  $\Delta = n_2 x_2 - n_1 x_1$  - оптическая разность хода волн.

Ур. 1.13 показывает, что энергия результирующего колебания не равна сумме энергий складывающихся колебаний. А результат сложения зависит от разности фаз  $(\Phi_2 - \Phi_1)$  исходных колебаний.

В реальных условиях колебания, описанные в

1.11 не могут быть строго гармоническими и длиться бесконечно долго с неизменной амплитудой. Обычно колебания время от времени обрываются и возникают вновь уже с иной, нерегулярно измененной фазой, т.е. не являются строго гармоническими. В этом случае средняя по времени наблюдения интенсивность  $I$  волны, пропорциональна среднему значению квадрата ее амплитуды  $E_m^2$ :

$$I \sim \langle E_m^2 \rangle = \left\langle 4E_0^2 \cos^2\left(\frac{\pi\Delta}{\lambda} + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) \right\rangle = \langle 4E_0^2 \cos^2(\Phi_2 - \Phi_1) \rangle \quad (1.14)$$

и равна

$$I = \left\langle 2I_0 \cos^2 \left( \frac{\pi\Delta}{\lambda} + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \right) \right\rangle = \left\langle 2I_0 \cos^2 (\Phi_2 - \Phi_1) \right\rangle \quad (1.15)$$

где  $I_0 = I_1 = I_2$  - интенсивность каждой из накладываемых волн.

Интенсивность результирующей волны зависит от разности хода и разности начальных фаз. Поэтому целесообразно рассмотреть два случая распространения волн:

а) Распространение некогерентных волн от независимых источников с начальными фазами  $\alpha_1(t)$  и  $\alpha_2(t)$ , которые являются случайными функциями времени, причем их разность начальных фаз  $\delta = \alpha_1 - \alpha_2 = f(t)$  также изменяется со временем. Поэтому  $\left\langle \cos^2 (\Phi_2 - \Phi_1) \right\rangle = \frac{1}{2}$ , тогда  $\left\langle E_m^2 \right\rangle = 2E_0^2 = E_0^2 + E_0^2$  и интенсивность  $I$  результирующей волны складывается из интенсивностей  $I_1$  и  $I_2$  накладываемых волн:

$$I = I_1 + I_2 = 2I_0 \quad (1.16)$$

б) Разность фаз колебаний  $\alpha_1(t)$  и  $\alpha_2(t)$  сохраняется неизменной в течении времени, т.е.  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha(t)$  и  $\delta = \alpha_1 - \alpha_2 = 0$ . Средняя энергия результирующего колебания отличается от суммы средних энергий исходных колебаний. В зависимости от разности фаз средняя энергия может быть больше или меньше.

$$E_m^2 = 4E_0^2 \cos^2 \left( \frac{\pi\Delta}{\lambda} \right) = 2E_0^2 \left( 1 + \cos \frac{2\pi\Delta}{\lambda} \right) \quad (1.17)$$

Таким образом, интенсивность  $I$  результирующей волны также определяется только значением оптической разности хода  $\Delta$ , не зависящей от времени:

$$I = I_0 \sqrt{2 \left( 1 + \cos \frac{2\pi\Delta}{\lambda} \right)} \quad (1.18)$$

При распространении двух когерентных волн с одинаковыми фазами, т.е.  $\cos \frac{2\pi\Delta_{max}}{\lambda} = 1$ , то интенсивность результирующей волны максимальна

$I = I_{max} = 2I_0$ , возникает интерференционный максимум. Условием возникновения интерференционного максимума является то, что оптическая разность хода волн должна равняться четному числу полудлин волн, это описывается следующим образом:

$$\Delta_{max} = 2m \frac{\lambda}{2} \quad (1.19)$$

где  $m = 0 = \pm 1 = \pm 2, \dots$  - порядок интерференции.

При распространении двух когерентных волн с противоположными фазами, т.е.  $\cos \frac{2\pi\Delta_{min}}{\lambda} = -1$ , то интенсивность результирующей волны минимальна

$I = I_{min} = 0$ , возникает интерференционный минимум. Условием возникновения интерференционного минимума является то, что оптическая разность хода волн должна равняться нечетному числу полудлин волн, это описывается следующим образом:

$$\Delta_{min} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (1.20)$$

где  $m = 0 = \pm 1 = \pm 2, \dots$  - порядок интерференции.

На явлениях когерентности и интерференции света основан метод когерентного суммирования пучков, который используется для формирования заданного распределения интенсивности. Однако существуют и другие методы суммирования пучков, которые будут рассмотрены в следующем подразделе.

### 1.3 Основные методы сложения лазерных пучков

Существует три метода формирования заданного распределения интенсивности: объединение пучка «side-by-side», которое является некогерентным суммированием; системы когерентного суммирования пучков с черепичной (составной) и с заполненной апертурой; последовательное и параллельное спектральное суммирование пучков. Реализации этих методов суммирования пучков из матрицы лазеров условно показаны на рис. 1.7.

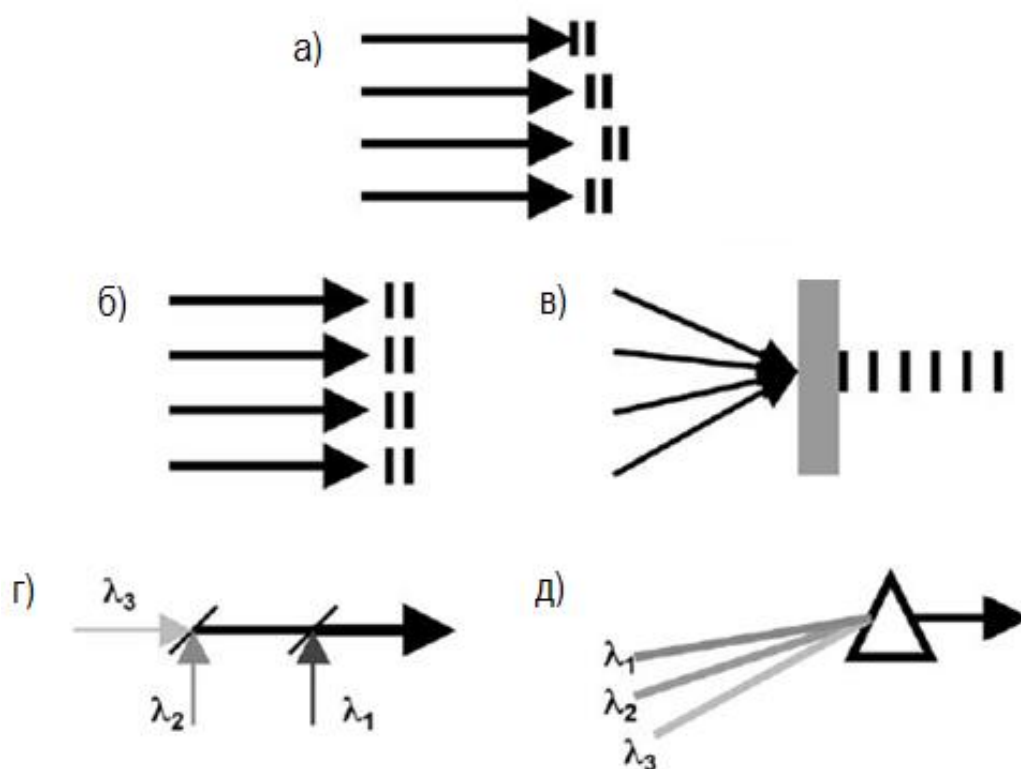


Рисунок 1.7 – Условные схемы суммирования пучков: объединение пучка «side-by-side» (а); системы когерентного суммирования пучков с черепичной (tiled) или составной (conformal) апертурой (б) и с заполненной (filled) апертурой (в); последовательное (г) и параллельное (д) спектральное суммирование пучков [10].

Первый класс – это объединение пучка «side-by-side» (один в один), в котором матрица элементов может (или не может) работать на одной длине волны. В данном методе не контролируются относительные спектры и фазы элементов. В этот класс попадают матрицы диодных лазеров. Яркость этих типов источников не может быть больше, чем яркость одного элемента матрицы. В дальнейшем мы не будем рассматривать данный тип суммирования пучков.

Следующий класс это когерентное суммирование пучков, в котором все элементы матрицы работают в одном спектральном диапазоне и их относительные фазы управляются таким образом, чтобы излучения от отдельных элементов интерферировали между собой. Здесь фазы элементов необходимо контролировать с точностью до малой доли длины волны ( $2\pi$  по фазе).

Следующий класс – спектральное суммирование пучков, в котором матрицы лазеров работают на разных длинах волн. В данной системе дисперсионная оптическая система используется для перекрытия пучков в ближней и дальней зонах. Основным главным требованием в спектральном суммировании пучков является то, что спектры отдельных матриц не должны перекрываться друг с другом.

К системам с когерентным и спектральным суммированием пучков в основном предъявляют различные требования на выходе элементов матрицы, потому что электрические поля векторно суммируются в когерентном суммировании пучков, в то время как в спектральное суммирование пучков добавляется мощность. В табл. 1.1 приведены основные требования для выходных элементов матрицы

Таблица 1.1 – Основные требования для выходных элементов матрицы

| Свойства              | Спектральное суммирование пучков  | Когерентное суммирование пучков   |
|-----------------------|---|-----------------------------------|
| Энергетический спектр | неперекрывающаяся   | Одна и та же для всех элементов   |
| Управление фазой      | нет требований  | Идеальный контроль, $2\pi$        |
| Поляризация           | нет требований  | Мгновенный относительный контроль |
| Амплитуда             | нет требований  | Мгновенный относительный контроль |
| Выравнивание элемента | Требования дифракционно-ограниченного пучка необходимо для всех элементов системы |                                   |

Эти основные требования не зависят от конкретной реализации. Тем не менее, в некоторых конкретных реализациях, могут появиться дополнительные требования, по отношению к характеристикам элементов матрицы. Например, в спектральном суммировании пучков, было бы желательно, чтобы элементы имели одинаковую поляризацию, потому что некоторые оптические компоненты могут быть чувствительны к поляризации; однако это стремление зависит от

реализации, в отличие от основных требований. Очевидно, что когерентное суммирование пучков накладывает большие требования на выходные элементы, чем спектральное суммирование пучков.

Основные требования в спектральном суммировании смягчены, поскольку здесь складываются только мощности (т.е., является некогерентным сложением). Главным требованием является то, что энергетические спектры элементов не должны перекрываться друг с другом. Если есть перекрытие в энергетических спектрах, тогда для эффективного суммирования пучков необходимо контролировать фазы в перекрывающейся части спектра, что, является уже когерентным суммированием.

Для когерентного суммирования пучков, при сложении электрического поля, необходим контроль поляризации и амплитуды элементов, в каждый момент времени. Выходные энергетические спектры должны быть одинаковыми, и фазы должны иметь соответствующие отношения для конструктивного суммирования. Если свойства элемента отклоняются от перечисленных в табл. 1.1, эффективность пучка уменьшается.

В дальнейшем мы будем рассматривать только системы с когерентным суммированием пучков, т.к. целью данной работы является исследование возможностей создания оптических вихревых пучков, используя методы фазирования пучков, которые применяются в задачах когерентного суммирования лазерных пучков.

#### 1.4 Реализация когерентного суммирования

Методы когерентного суммирования пучков можно разделить на два основных – это пассивный и активный. В пассивном методе отсутствует обратная связь, которая служит для выравнивания фаз оптических элементов. Более подробно пассивный метод описан в работе [11]. В нашей работе мы будем использовать активный метод, поэтому опишем его более подробно.

Активное когерентное суммирование пучков из  $N$  лазерных усилителей создается общим задающим генератором, что представляет собой подход, при котором происходит масштабирование лазерной яркости  $B$  (определяется как  $B \sim \text{мощность}/BQ^2$ ). Что выходит за пределы основной одноэлементной лазерной технологии. Идеально, выходной суммированный пучок ведет себя как один пучок, и яркость, таким образом, увеличивается на множитель  $N$  для несфазированного массива или на множитель  $N^2$  для любого отдельного лазера. Весомым преимуществом системы, является небольшое уменьшение мощности при отказе любого элемента усиления

На рис. 1.8 показана блок-схема для активного когерентного суммирования пучков. Один задающий генератор делится на несколько источников из  $N$  каналов. Каждый канал содержит фазово-управляющий элемент, способный накладывать, по крайней мере, одну волну фазы, и лазерный усилитель, сохраняющий когерентность (или цепочку усилителей), который увеличивает мощность канала до возможного предела. Выходная мощность от всех  $N$  каналов геометрически складывается с помощью одной или нескольких светоделителей, либо поворотных зеркал.

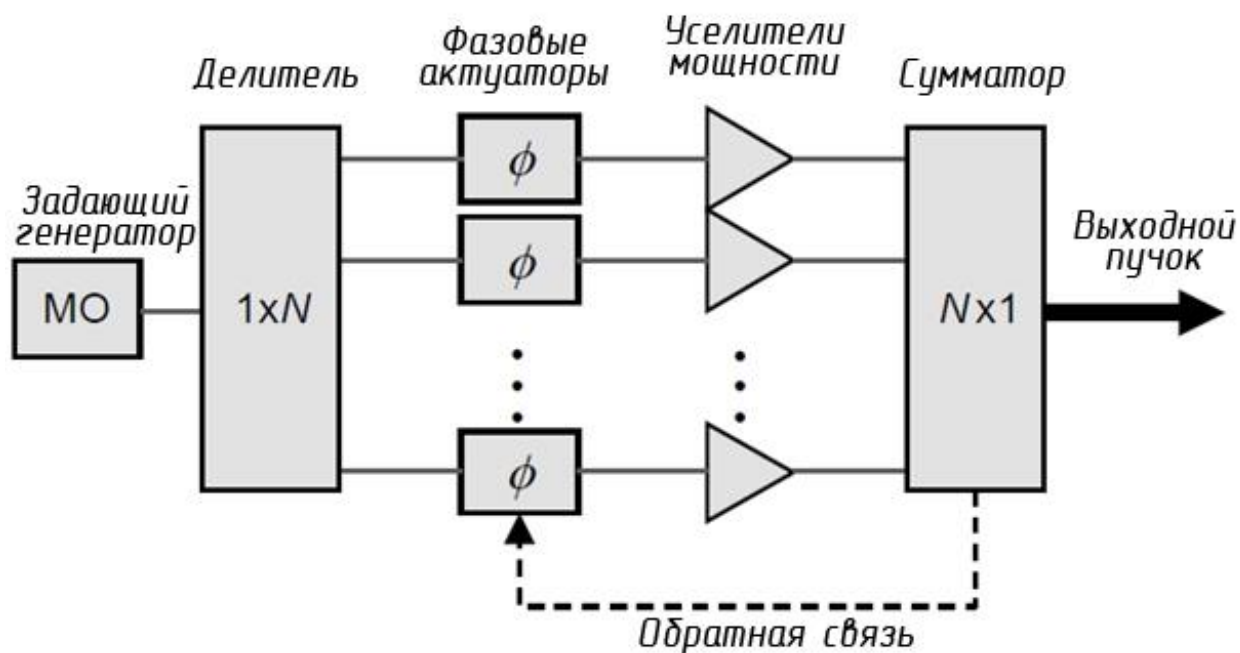


Рисунок 1.8 – Блок-схема с активной фазовой синхронизацией для решетки из  $N$  каналов задающий генератор – усилитель мощности (МОРА)



Из рис. 1.8 можно выделить три ключевых технологии, которые интегрированы для фазово-управляемой, когерентной, высокомошной лазерной системы:

- лазерные усилители, сохраняющие когерентность из общего задающего генератора, обеспечивая при этом высокое усиление и высокую выходную мощность;

- оптическая система, обеспечивающая геометрическое перекрытие усиленных пучков в дальней зоне и, в некоторых реализациях, в ближней зоне;

- активная управляющая система, синхронизирующая фазы усиленных выходных пучков с помощью обратной связи по замкнутому циклу.

а) Задающий генератор – усилитель мощности (МОРА). Главным требованием для высокой эффективности когерентного суммирования пучков является то, что объединённые пучки должны быть взаимно когерентными в пространстве и во времени для достижения высокого контраста интерференционной картины. Это означает, что лазеры должны быть пространственно-когерентными, сбалансированными по мощности, с идентичной поляризацией, с одинаковой длиной пути, и синхронизированными по фазе с высокой точностью. Когда эти требования не выполняются, то эффективность суммирования пучков падает.

б) Геометрическое перекрытие пучков. Как показано на рис. 1.7, реализация когерентного суммирования пучков может быть разделена на два класса, характеризующихся выходными формами: системы с черепичной (tiled) или составной (conformal) апертурой и системы с заполненной (filled) апертурой.

В системе с составной апертурой, отдельные элементы имеют выходы, которые прилегают друг к другу, и интерференция возникает только в дальнем поле. Реализацию этого вида можно рассматривать как синтезированную плоскую волну. Чтобы свести к минимуму боковые лепестки и получить максимальную интенсивность в дальней зоне, коэффициент заполнения должен приближаться к единице (т.е., пространства между плитками должны быть сведены к минимуму).

При реализации с заполненной апертурой возникает интерференция в ближней зоне. Объединение пучка с помощью заполненной апертуры можно рассматривать как обратную светоделительную призму, и соответствующие отношения фазы, амплитуды и поляризации между несколькими пучками должны обеспечивать эффективное объединение. Кроме того, в волоконной системе, объединенный пучок можно рассматривать как расщепитель, работающей в обратном направлении [10].

в) Активный фазово-управляемый контроль. Значительная часть научной литературы о когерентном суммировании пучков сосредоточена на средствах, с помощью которых лазеры управляются фазировано  $|2\pi|$ .

Для того что бы метод фазовой синхронизации успешно работал вне лабораторных условиях, он должен иметь эффективную пропускную способность управляемую до нескольких килогерц для отклонения акустически связанного фазового шума и поддержки стабильности среднеквадратичной фазы между каналами в пределах  $1 \text{ рад}$ . Основным требованием при выборе способа управления фазой является, достижение высокой скорости и высокой точности управления для соответствующего числа каналов  $N$ . Эти методы делятся на три широких классов (табл. 1.2) [11].

- Оптическое гетеродинное детектирование (OHD – optical heterodyne detection).

В методе OHD, опорный луч выходит из задающего генератора, при этом частота сдвигается на  $\Delta\omega$  при прохождении через акустооптический модулятор перед тем, как произойдет интерферометрическое объединение с пучком малой мощности, отделенного от массива светоделителем (рис. 1.9). Квадратичный фотодетектор принимает сигнал наложенных полей от опорного и отделенного пучка и вырабатывает напряжение, зависящее от времени.

Так же метод OHD может быть реализован в пространственной области путем наложения наклона (пространственный частотный сдвиг) между сигналом и опорным пучками, что приводит к пространственной интерференционной картине.

Таблица 1.2 – Сравнение трех основных классов активного фазово-управляемого контроля для когерентного суммирования пучков

| Метод   | OHD                                 | Синхронный мультидизеринг (LOCSET) | Метод координатного спуска (SPGD) |
|---|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Количество каналов  | не ограничено; параллельная система | $N = 32$ и более                   | $N=10$ с частотой 10 кГц          |
| Количество детекторов   | $N$                                 | 1                                  | 1                                 |
| Управление частотным диапазоном   | $>10$ кГц                           | $>10$ кГц                          | масштабирование как $N^{-1}$      |
| Установка   | ручная                              | автоматическая                     | автоматическая                    |
| Необходимость в радиочастотной электронике  | да                                  | да                                 | нет                               |
| Необходимость в опорной оптике  | да                                  | нет                                | нет                               |
| Среднеквадратичная фазовая ошибка   | $\lambda/80$                        | $\lambda/80$ ( $N = 32$ )          | $\lambda/40$ ( $N = 8$ )          |
| Выделенные ячейки указывают на недостатки связанные со сложностью системы, либо с ограниченной возможностью масштабирования |                                     |                                    |                                   |

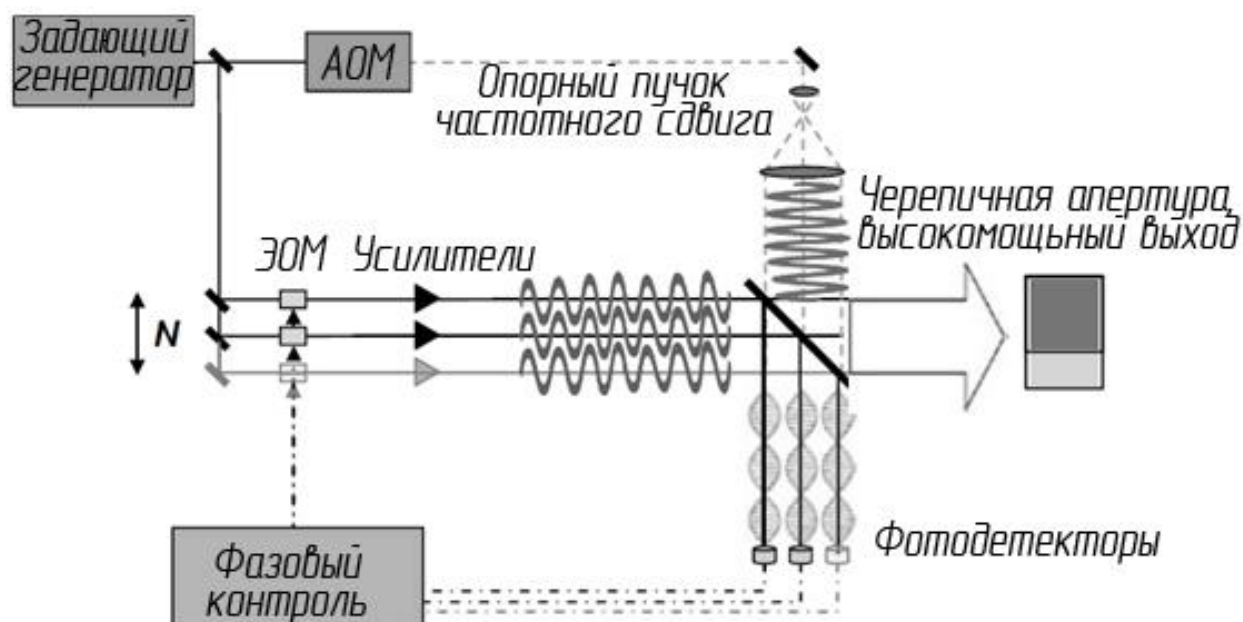


Рисунок 1.9 – Блок-схема OHD – метода

Напряжение детектора состоит из постоянного фонового тока, модулированного на разностной частоте вследствие интерференции между сигналь-

ным и опорным пучками. Это синусоидальное биение проходит через насыщенный усилитель и сравнивается с аналогичным тактовым сигналом, вышедшего из высокочастотного источника питания акустооптического модулятора. Временная задержка или разность фаз между краями этих двух сигналов соответствует оптической разности фаз между сигнальным и опорным пучками. Затем этот сигнал подается обратно в электрооптический модулятор (ЭОМ), управляющего фазой усилителя в пределах  $2\pi$ . Каждый пучок управляется независимо с той же фазой, что и опорный пучок, таким образом, они независимы друг от друга.

Основным преимуществом метода ОНД, является его масштабируемость для большого количества пучков  $N$ . Все пучки управляются непосредственно от опорного. Следовательно, фазовое управление каждого пучка не зависит от наличия или отсутствия других пучков. Поэтому нет никаких физических ограничений на количество пучков, которые могут быть объединены.

Поскольку метод ОНД требует одного фотодетектора для каждого пучка, то он работает лучше всего с составной апертурой, где происходит достаточно простое наложение опорного пучка с составной апертурой на выходе пучка.

Одним из недостатков этого метода, является то, что не все пучки могут быть синхронизированы между собой. Разъюстировка между сигнальным и опорным пучками, дрейф высокочастотной электроники или статический фазовый сдвиг в главном выходном пучке, по сравнению с отдельным пучком, могут изменять фазовую синхронизацию установки между пучками, без изменения фазы высокочастотного детектора. Такие разъюстировки не влияют на динамическую стабилизацию фазы, но они накладывают статические фазовые ошибки, между пучками, которые должны быть устранены с помощью ручной или автоматической регулировки установки [11].

- Синхронный мультидизеринг.

Этот метод фазовой синхронизации схож с методом ОНД, он также использует гетеродинные биения. Метод синхронного мультидизеринга исполь-

зовался для фазировки матриц высоко-мощных лазеров в контексте атмосферного распространения. Однако отсутствие высокоскоростных модуляторов и электронных датчиков серьезно ограничивали производительность. При методе синхронного мультидизеринга фазирование происходит следующим образом, на каждый лазерный канал накладывается малый фазовый дизер ( $\ll 1 \text{ рад}$ ) с уникальной частотой, путем наложения управляющего напряжением на ЭОМ. Один из вариантов - это время разделения между каналами на одной модуляционной частоте с одновременным сокращением контрольного частотного диапазона. Детектор, который регистрирует на выходе объединенный пучок, будет выявлять суперпозицию биений, возникающую из-за интерференции между различными пучками. Применение стандартных методов высокочастотной демодуляции может выделить уникальный дизер пропорциональный фазовой ошибке между каждым каналом и остальной матрицей. Эти сигналы ошибок управляют цепью обратной связи, обеспечивающей сфазированность пучков.

Преимущества метода синхронного мультидизеринга заключаются в использовании одного детектора для измерения фазовой ошибки целой матрицы и уклонение от неопределенности в установке фазы, присущие ОНД - методу. Минимизация сигналов биения при объединении пучков происходит, когда все пучки находятся в фазе. Главным недостатком этого метода является сложность электроники и цена. В настоящее время метод имеет ограниченное количество каналов, до 32.

- Метод координатного спуска.

Пожалуй, самым простым методом фазирования пучков, является метод координатного спуска, при котором происходит максимизация мощности в центральном максимуме в дальней зоне. Наиболее широко используется метод стохастического параллельного градиентного спуска (SPGD - stochastic parallel gradient descent). В этом методе фазы массива пучков одновременно изменяются на небольшие статистически некоррелированные суммы, и соответствующее изменение мощности в дальнем поле в центральном максимуме. Фазовые уста-

новки задаются пропорционально детектируемым изменениям мощности, которые приходится на максимальную мощность, когда все пучки находятся в фазе.

В этом методе есть много возможностей для оптимизации производительности, но этот метод имеет ограничения в масштабировании каналов, поскольку каждый новый канал должен подвергаться дизеренгу в фазовом пространстве. Следовательно, пропускная способность цепи обратной связи падает пропорционально  $1/N$ . Несмотря на данное ограничение, этот метод является относительно дешевым и простым для реализации с использованием программируемых компьютеров, из-за отсутствия высокоскоростной высокочастотной электроники. Следовательно, метод координатного спуска привлекателен для систем с небольшим количеством ( $N \ll 100$ ) каналов или с усилителями с низким уровнем шума, которые не требуют высокоскоростного контроля фаз. Этот метод является перспективным, так как есть возможность обойти ограничения на масштабируемость каналов при увеличении стоимости и сложности системы.

#### - Метод LOCSET

Для того чтобы когерентно объединить несколько лазеров, требуется точный контроль оптической фазы. Аналогично методу SPGD, в методе LOCSET используется один фотодетектор для активного управления фазой. Однако, LOCSET не является стохастическим методом. Метод основан на радиочастотной демодуляции. LOCSET электроника способна самостоятельно определять сигнал ошибки, который пропорционален оптической разности фаз каждого пучка, измеренного относительно каждого пучка в матрице. Отличные показатели метода LOCSET по определению сигналов ошибки для большого количества каналов (и высокой пропускной способности) делает его привлекательным для когерентного суммирования пучков, не смотря на то, что его можно применять только для коррекции фазового сдвига.

Метод LOCSET показан на рис. 1.10, обычно используется конфигурация МОРА, где пучок лазера с узкой линией генерации разделяется на  $N$  пучков

и запускает массив волоконных усилителей. До начала усиления, каждый из  $N$  пучков проходит через фазовый модулятор, позволяющий LOCSET электронике корректировать фазовый сдвиг каждого пучка. Каждый из  $N$  лучей усиливается, коллимируется, и попадает на выходную апертуру. Свет от частичного отражателя перекрывается (интерferирует) на одиночном фотодетекторе, который подается в управляющую электронику LOCSET. Для достижения оптимального суммирования пучка, к каждому из  $N$  пучков добавляется небольшая амплитуда фазового дизера с уникальной радиочастотой. Затем этот фазовый дизер измеряется с помощью фотодетектора как биение интенсивности интерференции, которая содержит фазовую информацию, необходимую для когерентного суммирования пучков.

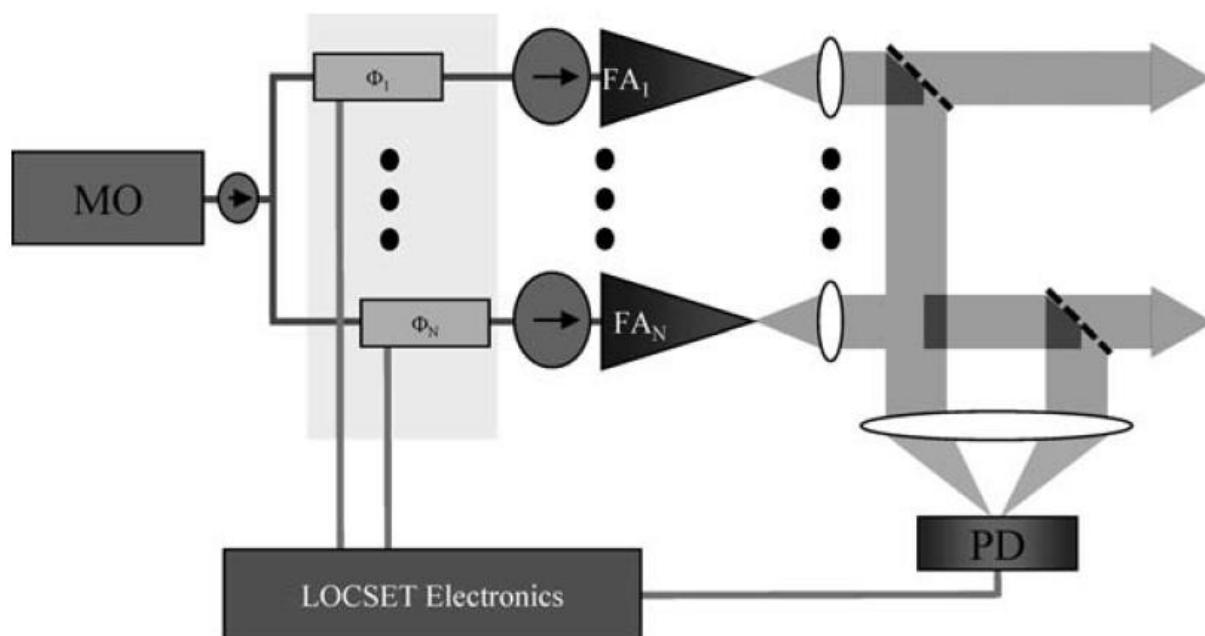


Рисунок 1.10 – Блок-схема метода LOCSET

## 1.5 Экспериментальные методы регистрации параметров распределения лазерных пучков

Самыми распространенными приборами для контроля параметров лазерного излучения являются камеры, основанные на ПЗС-матрицах (ПЗС – прибор с зарядовой связью). ПЗС-камера отвечает за регистрацию лазерного

излучения и передачу полученных данных на персональный компьютер (ПК). За регистрацию, обработку и визуализацию данных отвечает программное обеспечение (ПО). ПО сохраняет полученные данные, обеспечивая возможность их последующей обработки и редактирования.

Типичная блок-схема системы регистрации распределения интенсивности показана на рис. 1.11



Рисунок 1.11 – Типичная блок-схема системы регистрации распределения интенсивности лазерного излучения

Лазерное излучение регистрирует ПЗС-камера. Через USB-интерфейс происходит связь камеры с компьютером. На ПК установлен драйвер устройства, который осуществляет управление камерой.

Взаимодействие с ПО осуществляется через графический интерфейс пользователя. Интерфейс предусматривает способы управления регистрацией, в частности: количеством регистрируемых в ходе эксперимента кадров, временем накопления сигнала для каждого кадра, способом синхронизации с источником излучения. Он также служит для масштабирования графиков, полученных в результате визуализации, и позволяет просматривать серии кадров.

Распределение интенсивности может отображаться в двухмерном и трехмерном изображении (рис. 1.12), а так же возможно изображение распределения интенсивности излучения по строке или по столбцу матрицы .

В данной работе, помимо ПЗС-камеры, используется датчик Шака-Гартмана – это датчик волнового фронта (ДВФ), который является одним из элементов адаптивной системы корректировки лазерного излучения. С его по-



мощью измеряется кривизна волнового фронта. Основными причинами кривизны волнового фронта являются турбулентность атмосферы, неидеальность форм оптических элементов системы, погрешности при юстировке системы и др.

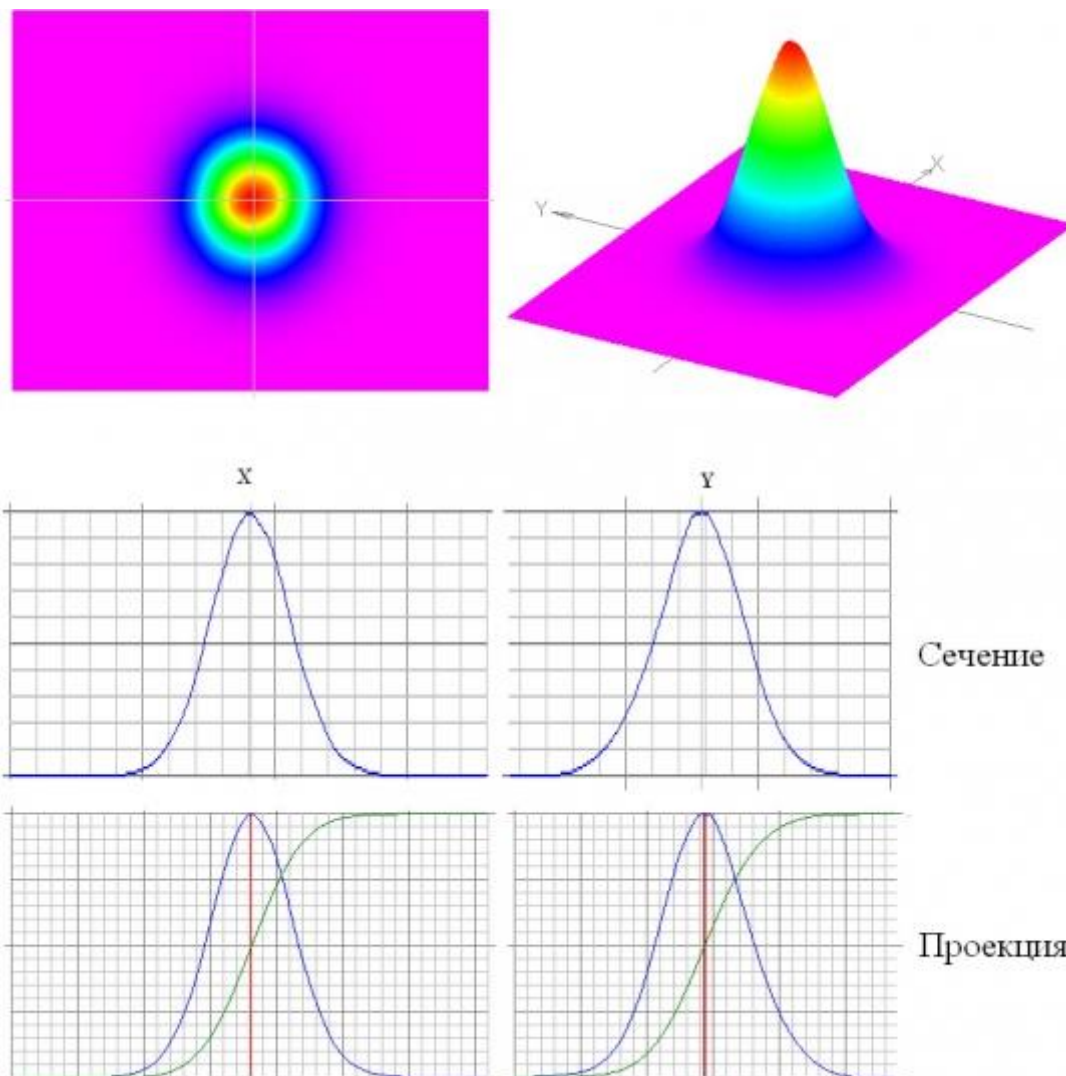


Рисунок 1.12 – Визуализация распределения интенсивности излучения лазерного пучка

Одно из главных преимуществ датчика Шака-Гартмана – это его способность измерять большой диапазон наклонов волнового фронта, когда искажения другими методами (например, интерференционными) не измерить. Такой датчик может быть использован для определения aberrаций в профиле неколлимированного лазерного пучка. Кроме того, у него малая чувствительность к механическим вибрациям, и он может работать с импульсами большой мощности и фемтосекундной длительностью [12].

Принцип работы ДВФ Шака-Гартмана показан на рис. 1.13. Излучение проходит через линзовый растр – матрицу микролинз – и падает на фотоприемник. Линзовый растр состоит из идентичных линз, называемых субапертурами. Они разбивают падающий фронт на малые потоки и фокусируют их на приемнике. Когда приходящий волновой фронт плоский, все сфокусированные изображения расположены в правильной сетке, обусловленной расположением линз. Если падающая волна имеет какие-либо искажения, то изображения смещаются со своих номинальных значений.

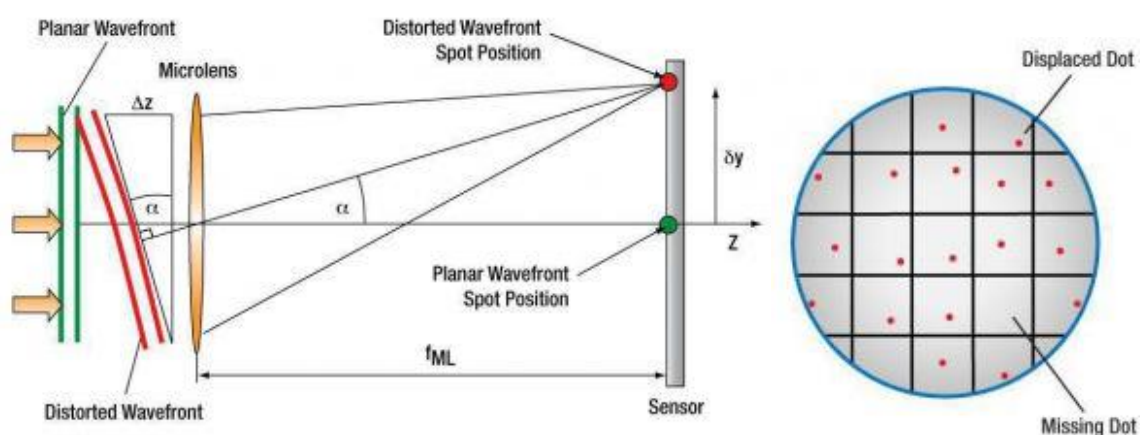


Рисунок 1.13 – Принцип работы датчика Шака-Гартмана [12]

Изображение фокальных пятен называется гартманограммой. По ее виду можно судить об искривленности волнового фронта. На рис. 1.13 подробно показано прохождение волнового фронта через одну микролинзу. Сфокусированные на детекторе световые точки будут располагаться на оси линз (показаны зеленым), только если фронт плоский. Для волнового фронта с сильными искажениями в области микролинз, место позиции сместятся в направлении X и Y (как показано красной точкой), так что каждое место находится далеко от оптической оси Z. Угол  $\alpha$  - это угол между искаженным волновым фронтом и плоским волновым фронтом.

Смещение центров изображений по двум ортогональным направлениям пропорционально средним наклонам волнового фронта в этих направлениях по субапертурам. Таким образом, ДВФ Шака-Гартмана измеряет наклоны волнового фронта, сам фронт восстанавливается из массива наклонов.

## 2 Экспериментальная установка

### 2.1 Описание экспериментальной установки

В настоящей работе исследуются возможности формирования вихревых оптических пучков с изменяемым орбитальным угловым моментом (ОУМ) на основе матрицы волоконных лазеров. Метод базируется на управлении фазой излучения отдельных субапертур матрицы с гексагональным расположением для создания набега фазы  $2\pi/6$  при  $l=1$  и  $2\pi/3$  при  $l=2$  при обходе вокруг центра синтезированного пучка. Основным преимуществом предлагаемого метода синтеза вихревого пучка является возможность быстрого сдвига фазы субапертур, обеспечивающего изменение ОУМ.

На рис. 2.1. представлена оптическая схема реализации системы, формирующей синтезированные пучки на основе когерентного суммирования пучков волоконных лазеров.

Излучение волоконного лазера (1) разделяется на семь каналов с помощью набора волоконных разветвителей (2). Далее эти каналы направляются на семиапертурный коллиматор (4) через семь фазосдвигающих ячеек (3). Семиапертурный коллиматор формирует пучки, которые ориентированы гексагонально. В данной установке для формирования оптических вихревых пучков достаточно шести субапертур, расположенных по внешнему радиусу семиапертурного коллиматора. На выходе каждой субапертуры расположена коллимирующая линза.

Длиннофокусная линза (5) предназначена для формирования аналога дальнепольного распределения излучения. Для анализа распределения интенсивности синтезированного пучка используется матричная CCD-камера Spiricon SP503U (9), на которую излучение попадает через коллиматор, который увеличивает пучок в 10 раз. Распределение интенсивности пучка в фокальной плоскости дальнепольной линзы определяется с помощью данной камеры, на которую падает часть излучения, разделенного светоделительной пластиной (8). Остальная часть излучения направляется на фотодетектор (11) с диа-

фрагмой диаметром 10 – 15 мкм, расположенный в фокусе линзы. Фотодетектор служит для формирования канала обратной связи, который предназначен для управления фазосдвигающими ячейками, посредством многоканального контроллера (12).

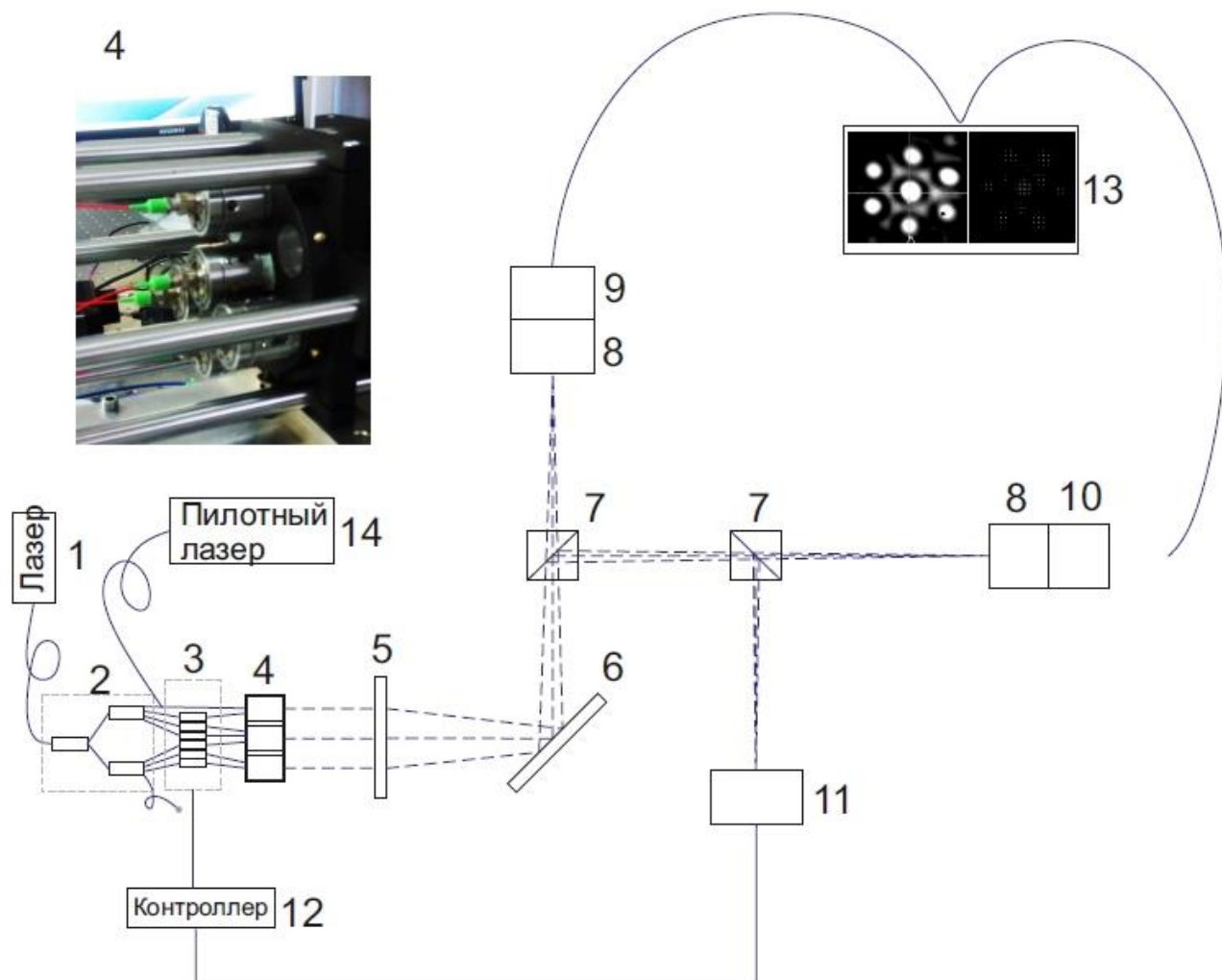


Рисунок 2.1 – Структурная схема системы формирования синтезированных пучков на основе когерентного сложения пучков волоконных лазеров:  
 1 – лазер; 2 – набор волоконных разветвителей; 3 – фазосдвигающие ячейки;  
 4 – семиапертурный коллиматор; 5 – длиннофокусная линза; 6 – зеркало;  
 7 – светоделительные кубики; 8 – коллиматоры; 9 – CCD-камера; 10 – датчик Шака-Гартмана; 11 – фотодетектор; 12 – контроллер; 13 – монитор;  
 14 – пилотный лазер.

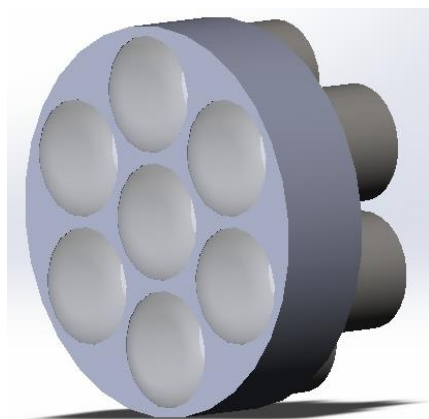
Так как в системе существуют фазовые флуктуации, контроллер работает последовательно следующим образом: сначала все пучки фазируются, затем

фазовое состояние одного пучка фиксируется, а остальные фазы пучков сдвигаются  $2\pi/6$  или  $2\pi/3$  относительно друг друга, тем самым, создавая оптический вихревой пучок, состояние которого является периодическим. Для того чтобы произвести юстировку системы вводится излучение пилотного лазера (14).

В данную экспериментальную установку был введен датчик Шака-Гартмана (11). Излучение на датчик, также как и на CCD-камеру, направляется через коллиматор (8), который увеличивает пучок в 10 раз. Изображения пучка, полученные с помощью CCD-камеры и датчика Шака-Гартмана, отображаются на мониторе (13).

Семиапертурный коллиматор состоит из семи субапертур. Которые изображены на рис. 2.2 а. Оптическая схема одной субапертуры (коллиматора) представлена на рис. 2.2. б.

а)



б)

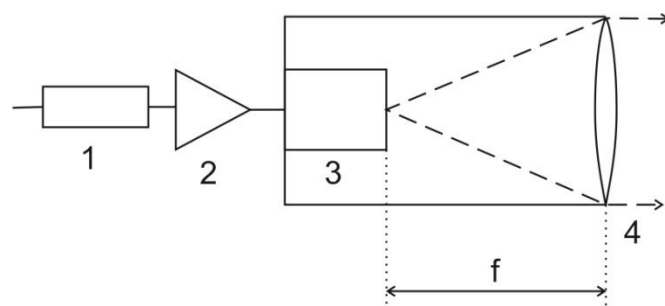


Рисунок 2.2 – Семиапертурный коллиматор (а)

и оптическая схема одного коллиматора (б):

1 – фазосдвигающая ячейка; 2 – усилитель мощности;

3 - позиционирующее устройство; 4 – коллимирующая линза

В данной схеме излучения от задающего генератора, поступают на фазосдвигающую ячейку (1), затем усиливается в волоконном усилителе мощности (2). Далее излучение попадает на коллимирующую линзу (4).

На выходе составной апертуры сформировано 7 параллельных пучков, которые затем объединяются в заданной плоскости. Для настройки и управления углами распространения пучков используются позиционирующие устрой-

ства (3). В данной экспериментальной установке настройка позиционеров осуществлялась вручную, однако в дальнейшем для этого будут использоваться пьезоэлектрические актуаторы для наиболее эффективной и точной настройки.

## 2.2 Методы настройки системы

Настройка системы осуществляется в два этапа: грубая и точная настройки. Юстировка системы начинается с настройки центрального коллиматора, который вставляется в монтажный диск, установленный по нормали к оптической оси. Затем настраиваются коллиматоры, расположенные по внешнему радиусу. Каждый коллиматор обладает трехосевым настроечным механизмом, который позволяет произвести настройку кончика волокна в фокальной плоскости коллимирующей линзы.

Юстировка коллиматора выполняется следующим образом:

- волокно коллиматора подсоединяется к волоконному лазерному источнику. На выходе коллиматора установлен поляриметр, который необходимо вращать для установки необходимого направления поляризации. Направление поляризации настраивается посредством вращения корпуса волоконного коллиматора. Для определения плоскости поляризации используется поляризационная пластинка и измеритель мощности. Фиксация коллиматоров осуществляется с помощью затяжки соответствующих винтов;

- затем осуществляется настройка фокуса коллиматора линзой, установленной на выходе центрального канала семиапертурного коллиматора. Для этого нужно перемещать кончик волокна вдоль оси Z;

- положение волокна вдоль осей X и Y юстируются так, чтобы исходящий пучок был параллелен оптической оси системы, т.е. осуществляется настройка наклона пучка;

- с помощью CCD-камеры возможно отслеживание изменений углов наклона волокна, и также возможно производить измерение профиля пучка.

После настройки центрального коллиматора, устанавливаются остальные шесть коллиматоров. Юстировка оставшихся шести коллиматоров повторяет шаги, описанные выше.

Точная настройка коллиматоров заключается следующем: в систему вводится светоделитель, и в фокальной плоскости располагается датчик Шака-Гартмана, определяющий степень кривизны волнового фронта пучка. Такая точная настройка волоконных актуаторов делается последовательно для всех коллиматоров.

### 2.3 Используемое оборудование

На основании описанной выше экспериментальной установки для создания оптических вихревых пучков было использовано следующее оборудование:

а) Драйвер для лазерных диодов от компании Innolume (Германия) (рис.2.3а). Драйвер обеспечивает быстрое и удобное питание любого из одно-модовых волоконных устройств Innolume. Работает на постоянном токе до 2 А. Имеет USB-выход с программным управлением рис.(2.3б).

а)



б)

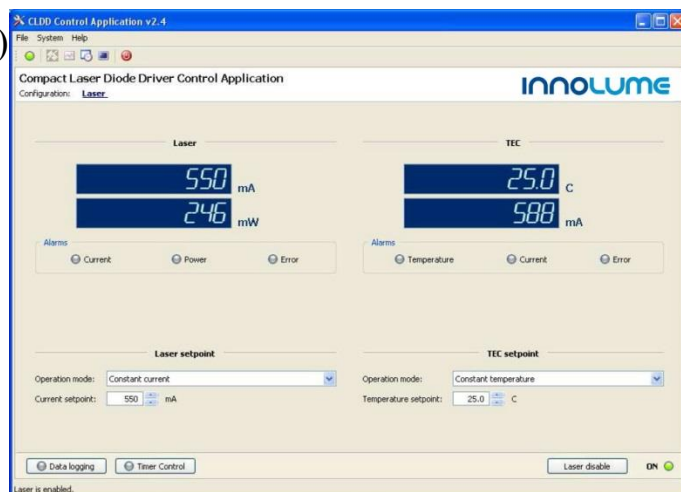


Рисунок 2.3 – Драйвер для лазерных диодов (а)

и программное обеспечение (б)

б) Узкополосный лазер LD-1064-DBR-150 от компании Innolume (Германия) с длиной волны 1064 нм, выходной мощностью 150 мВт и шириной



спектра 3 МГц (длина когерентности  $\sim 60$  м) со стабилизированным источником питания (рис.2.4).

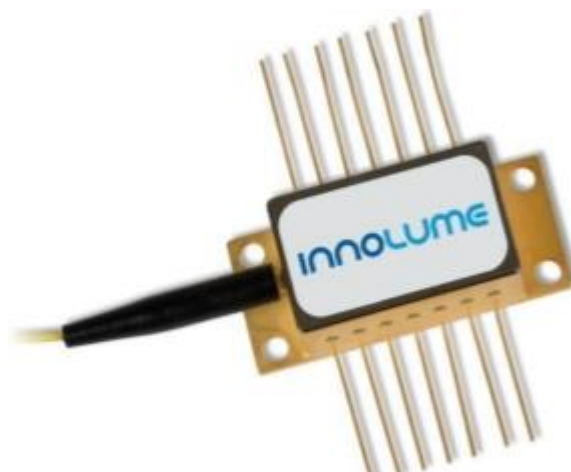


Рисунок 2.4 – Узкополосный лазер LD-1064-DBR-150

в) Волоконно-оптические разъединители PMC-P-1x2-1064 nm-50/50-0-622-3x54mm-1M и PMC-X-1x4-EVEN-1-622-100x80x10vv-1M на основе PM – волокна с сохранением состояния поляризации от компании LightComm (Китай).

На рис.2.5 показана структурная схема волоконно-оптического разъединителя.

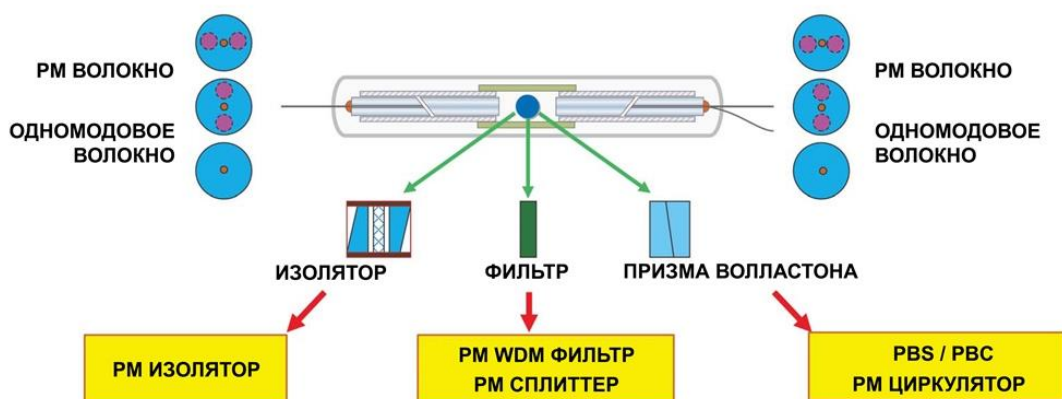


Рисунок 2.5 – Структурная схема волоконно-оптического разъединителя [11]

г) Волоконно-оптические фазосдвигающие ячейки FPS-002-10-90-PM-FC/APC от компании General Photonics (США) (рис.2.6). Фазосдвигающая ячейка FPS-002 – это оптоволоконное устройство, которое сдвигает или модулирует фазовые сдвиги до  $75\pi$  на частотах от 0 до 20 кГц.





Рисунок 2.6 – Волоконно-оптическая фазосдвигающая ячейка FPS-002

д) Датчик Шака-Гартмана WFS150-5C от фирмы THORLABS (рис.2.7).  
С диапазоном длин волн 300 – 1100 нм и фокусным расстоянием 3,7 мм



Рисунок 2.7 – Датчик Шака-Гартмана WFS150-5C

е) ПЗС – камера с USB подключением SP503U от фирмы Ophir Optronics (рис.2.8). Работает в широком динамическом диапазоне 64 дБ. Регистрирует спектральный диапазон от 190 до 1100 нм.



Рисунок 2.8 – Камера SP503U

## 2.3 Результаты экспериментальных исследований

### 2.3.1 Результаты эксперимента по когерентному сложению пучков.

На рис. 2.9 – 2.11 представлены результаты когерентного сложения излучения для двух, трех и четырех пучков.

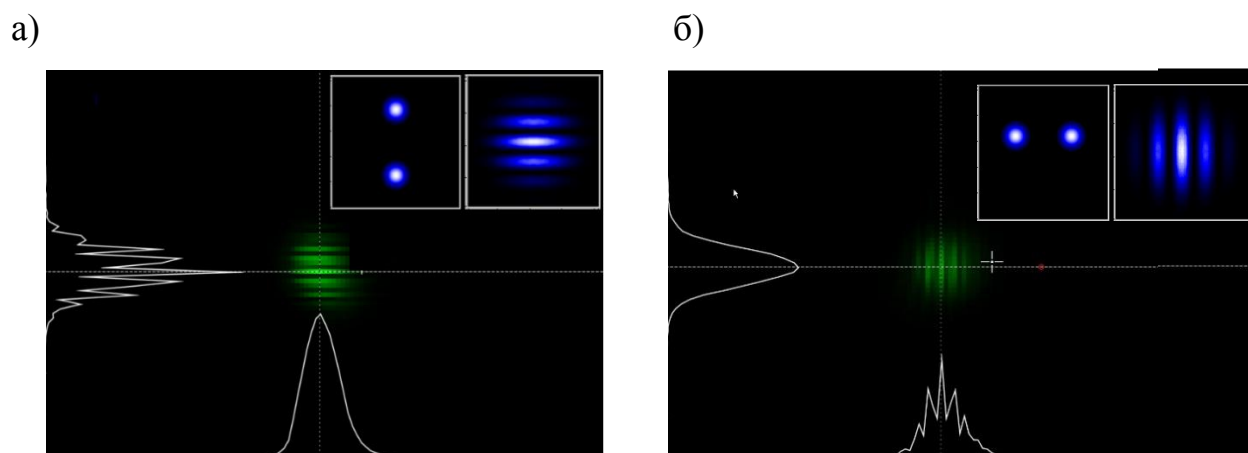


Рисунок 2.9 – Распределение интенсивности излучения в плоскости фокусировки при когерентном сложении 2-х пучков, расположенных вертикально (а) и горизонтально (б)

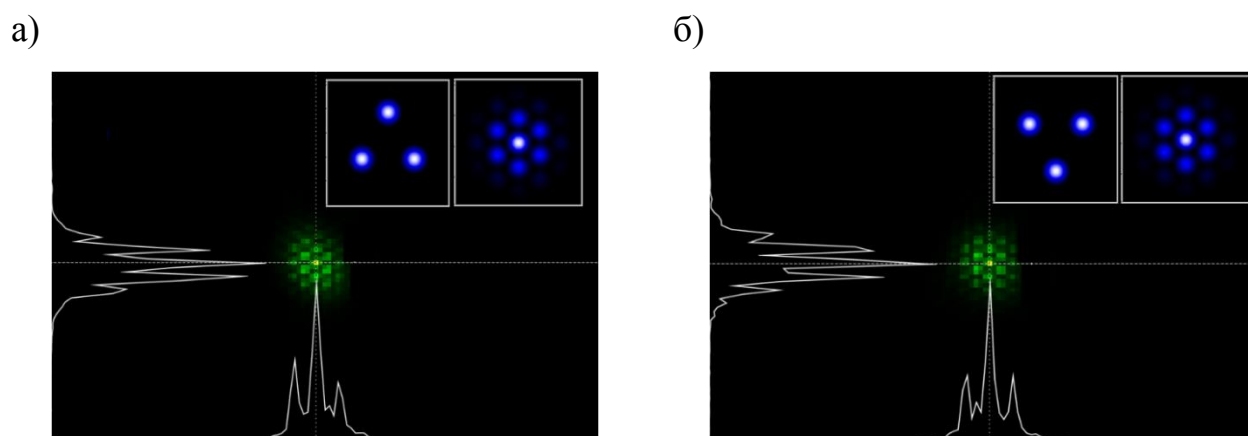


Рисунок 2.10 – Распределение интенсивности излучения в плоскости фокусировки при когерентном сложении 3-х пучков, расположенных в вершинах равностороннего треугольника

На рисунках кривыми линиями показаны сечения распределения интенсивности излучения по координатам  $X$  и  $Y$ , проходящие через точку с максимальным значением интенсивности излучения. Размер одного пиксела по обеим координатам равен 10 мкм. На всех рисунках в правом верхнем углу для сравнения приведены результаты численного моделирования (распределение ин-

тенсивности излучения в начальной плоскости и плоскости фокусировки, размер области в начальной плоскости 100 мм, размер области в плоскости фокусировки 200 мкм).

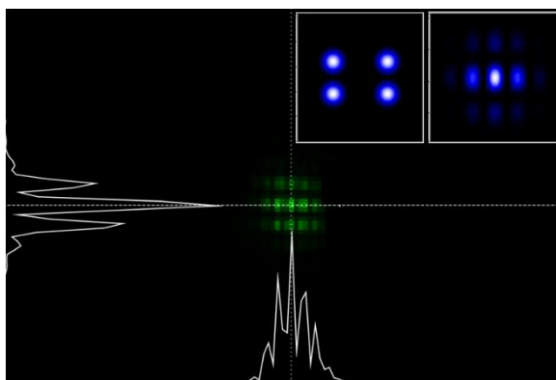


Рисунок 2.11 – Распределение интенсивности излучения в плоскости фокусировки при когерентном сложении 4-х пучков

Как видно из результатов сложения двух пучков (рис. 2.9) распределение интенсивности в плоскости фокусировки представляет классическую интерференционную картину с полосами перпендикулярными линии расположения двух когерентных источников излучения.

На рис. 2.10 представлены результаты когерентного сложения излучения для трех равноудаленных пучков. В данном случае просматривается гексагональная структура интерференционной картины. Стоит отметить, что в данном случае интерференционная картина при когерентном сложении излучения от трех пучков одинакова для различного расположения пучков.

На рис. 2.11 представлены результаты когерентного сложения излучения для четырех пучков, расположенных в вершинах прямоугольника. В данном случае просматривается прямоугольная структура интерференционной картины.

Когерентное сложение всех семи пучков, представлено на рис. 2.12 полученное распределение является наиболее интересным случаем с точки зрения эффективности передачи энергии на расстояние. Для любого количества пучков при когерентном сложении методом SPGD, когда отсутствует управление фазой, наблюдается непрерывное смещение и расплывание интерференционной

картины из-за случайных фазовых колебаний внутри каждого из каналов. Такой случай приведен на рис. 2.12 а.

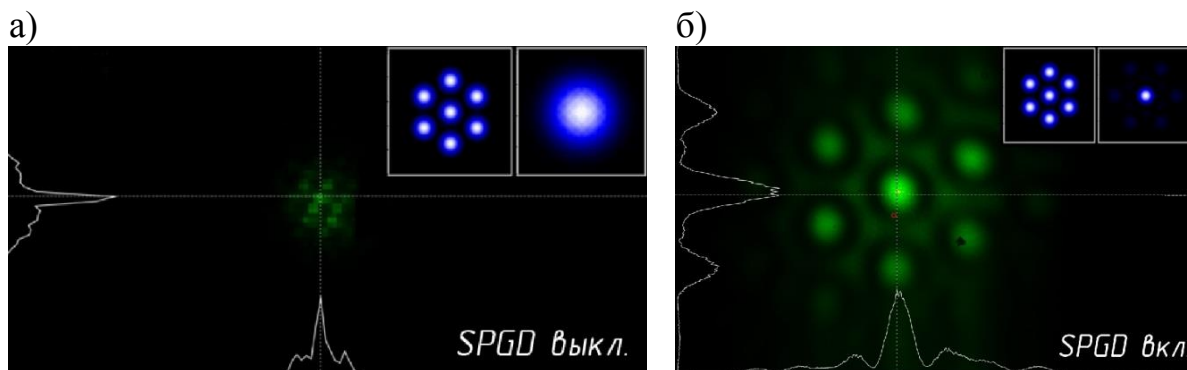


Рисунок 2.12 – Распределение интенсивности излучения в плоскости фокусировки при когерентном сложении семи пучков при управлении фазой излучения методом SPGD (а) и при отсутствии такого управления

Когда осуществляется управление фазой методом SPGD, то наблюдается стабилизация интерференционной картины, при котором положение максимума интенсивности излучения совпадает с положением диафрагмы фотоприемника, сигнал которого используется для замыкания обратной связи в методе SPGD. Здесь был установлен коллиматор, для повышения разрешения с увеличением 10. Видно, что в данном случае при фазировке излучения методом SPGD наблюдается выраженный максимум интенсивности излучения на оси синтезированного пучка (рис. 2.12 б). При этом некоторая часть энергии находится в «боковых лепестках» гексагонально расположенных вокруг центрального. Также как и в предыдущих случаях при отсутствии фазировки излучения наблюдается непрерывное смещение и расплывание данной интерференционной картины, которое иногда случайным образом приводит к частичной фазировке и появлению всплесков интенсивности излучения (рис.2.12 а).

Стоит отметить, что при когерентном сложении излучения всех семи пучков в центральном «лепестке» содержится более 50% мощности всего пучка. При этом важно отметить, что независимо от числа субпучков при их когерентном сложении значение интенсивности излучения на оси синтезированного пучка в плоскости фокусировки излучения возрастает пропорционально квадрату числа пучков. Поэтому при сложении семи пучков значение интенсивности

излучения на оси практически в 49 раз превосходит среднее значение интенсивности излучения, соответствующее фокусировке излучения одного пучка.

При сложении излучения пяти и шести субпучков, наблюдается интерференционная картина гексагонального типа и является чем-то средним между интерференцией трех и семи субпучков.

Важными характеристиками когерентного сложения пучков методом SPGD является скорость осуществления фазировки излучателей, обеспечивающей достижение предельного значения осевой интенсивности излучения в плоскости фокусировки, в также стабильность сохранения данного предельного значения. На рис. 2.13 представлена динамика изменения осевой интенсивности излучения в плоскости фокусировки (сигнала на фотодетекторе, используемого для обратной связи), а также управляющего напряжения на фазосдвигающих ячейках, при когерентном сложении всех семи пучков методом SPGD.

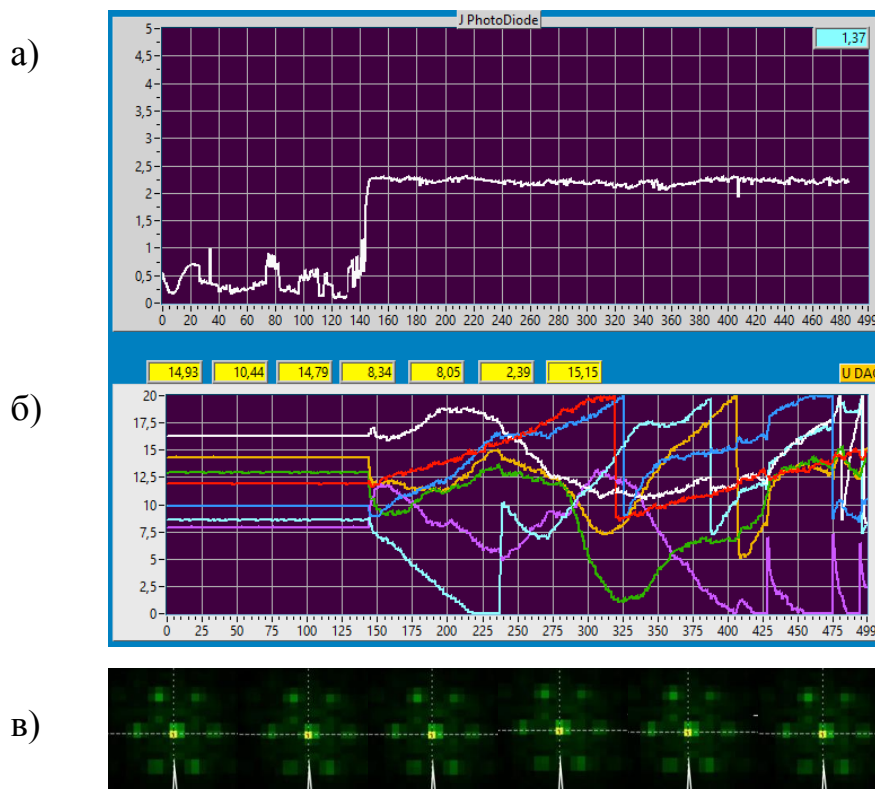


Рисунок 2.13 – Динамика изменения осевой интенсивности излучения в плоскости фокусировки (а), а также управляющего напряжения на фазосдвигающих ячейках (б), при когерентном сложении семи пучков методом SPGD.

Распределения интенсивности излучения в разные моменты времени (в)

Горизонтальная ось отображает номер итерации метода SPGD. Видно, что для достижения предельного значения интенсивности излучения необходимо порядка 10-15 итераций метода SPGD, что при рабочей частоте используемых фазосдвигающих ячеек в несколько кГц обеспечивает время выхода на предельное значение интенсивности излучения порядка нескольких миллисекунд. Стоит обратить внимание, что при достижении своего предельного значения интенсивность излучения на оси синтезированного пучка стабильно удерживается в диапазоне 5%, а интерференционная картина практически не изменяется. При этом видно, что управляющее напряжение на фазосдвигающих ячейках всех семи субапертур меняется существенным образом. Таким образом, происходит компенсация наведенных флуктуациями температуры и вибрациями оптоволоконка случайных фазовых набегов.

Кроме времени достижения фазировки (когерентного сложения) важно знать время сохранения данного состояния при отсутствии управления фазой излучения. На рис. 2.14 представлена динамика изменения осевой интенсивности излучения в плоскости фокусировки при отключении управления фазой на субапертурах синтезированного пучка при когерентном сложении всех семи пучков методом SPGD.

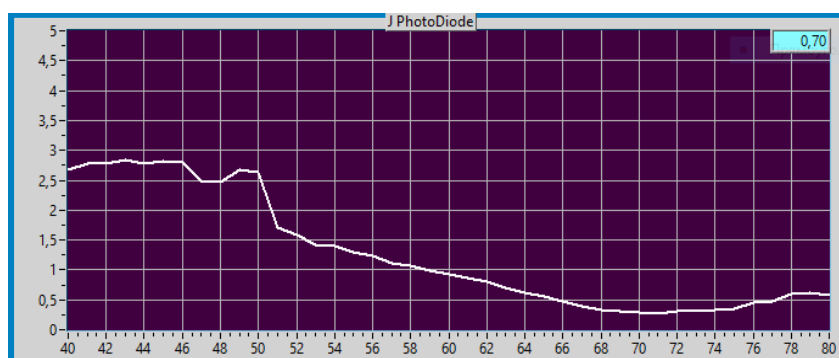


Рисунок 2.14 – Динамика изменения осевой интенсивности излучения в плоскости фокусировки (сигнала на фотодетекторе, используемого для обратной связи) при отключении управления фазой на субапертурах синтезированного пучка при когерентном сложении семи пучков методом SPGD. Горизонтальная ось отображает номер регистрации сигнала на управляющем компьютере с частотой 20 Гц.

Видно, что достаточно стабильная фазировка, обеспечивающая значения осевой интенсивности близкие к предельному значению, сохраняется в течение порядка 0.5 с. Можно отметить, что при наличии усилителей излучения в каждом канале распространения излучения матрицы волоконных лазеров случайные набег фазы будут более интенсивными и время сохранения стационарного фазового состояния после отключения управления может уменьшиться. Однако можно утверждать, что при возможности фазировки за время порядка  $10^{-6}$  с время сохранения стационарного фазового состояния будет на несколько порядков превышать время выхода на данное состояние, что обеспечивает возможность оперативного управления фазой, в частности для генерации вихревых пучков.

### 2.3.2 Результаты эксперимента по формированию оптических вихревых пучков

Алгоритм генерации вихревого пучка состоит из двух основных этапов:

- 1) Осуществление фазировки (когерентное сложение) излучения шести субапертур, расположенных по кругу (центральная апертура в формировании вихревого пучка не задействуется);
- 2) При помощи фазосдвигающих ячеек, за время сохранения стационарного фазового состояния, осуществляется равномерный сдвиг фазы. Так чтобы на соседних субпучках сдвиг фазы был равен  $2\pi/6$  или  $2\pi/3$ , а при обходе по кругу из шести субпучков общий набег фазы был равен  $2\pi$ .

В ходе эксперимента в системе когерентного сложения пучков были сформированы пучки с дислокацией в центре (на оси) с топологическим зарядом  $l=1$  и  $l=2$ . Пучки обладают ОУМ и представляют собой распределение интенсивности с нулевой интенсивностью в центре пучка. В начальный момент все пучки были когерентно сложены в дальней зоне (рис. 2.12 а) и сфазированы (рис. 2.12 б), затем фазовое состояние одного пучка было зафиксировано, а фазы остальных пучков сдвинуты  $2\pi/6$  при  $l=1$  (рис. 2.15 а)

и  $2\pi/3$  при  $l=2$  (рис. 2.15 б) относительно друг друга, формируя в результате интерференции синтезированный оптический вихревой пучок (в правом верхнем углу результаты расчета).

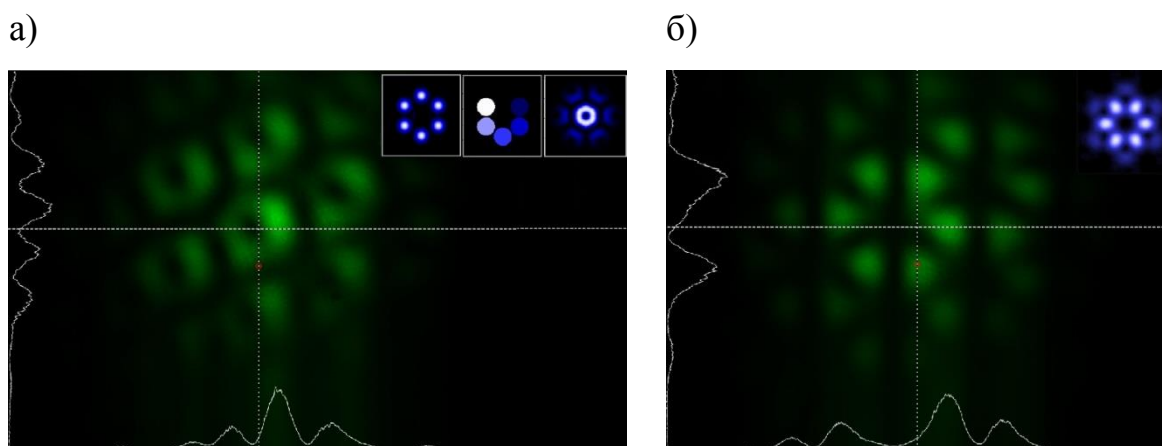


Рисунок 2.15 - Распределение интенсивности излучения в плоскости фокусировки при равномерном сдвиге фазы, когда на соседних субапертурах сдвиг фазы равен  $2\pi/6$  при  $l = 1$  (а) и  $2\pi/3$  при  $l = 2$  (б), а при обходе по кругу из шести субапертур общий набег фазы равен  $2\pi$ . В правом углу, для сравнения, приведены результаты численного моделирования (распределение интенсивности и фазы излучения в начальной плоскости, а также распределение интенсивности излучения в плоскости фокусировки)

Из рис. 2.15 видно, что распределение интенсивности излучения в плоскости фокусировки имеет кольцеобразную форму. Также можно обратить внимание, что как при численном моделировании, так и при эксперименте на периферии пучка присутствуют дугообразные боковые лепестки. Сравнение полученного в эксперименте распределения интенсивности излучения с результатами численного моделирования иллюстрирует высокую эффективность генерации вихревых пучков с помощью разработанного макета системы формирования лазерных пучков с управляемыми пространственными характеристиками.

На рис. 2.16 а представлена динамика изменения осевой интенсивности излучения в плоскости фокусировки, а на рис. 2.16 б - динамика изменения управляющего напряжения на фазосдвигателях, определяющее сдвиг фазы в каждом канале излучения.



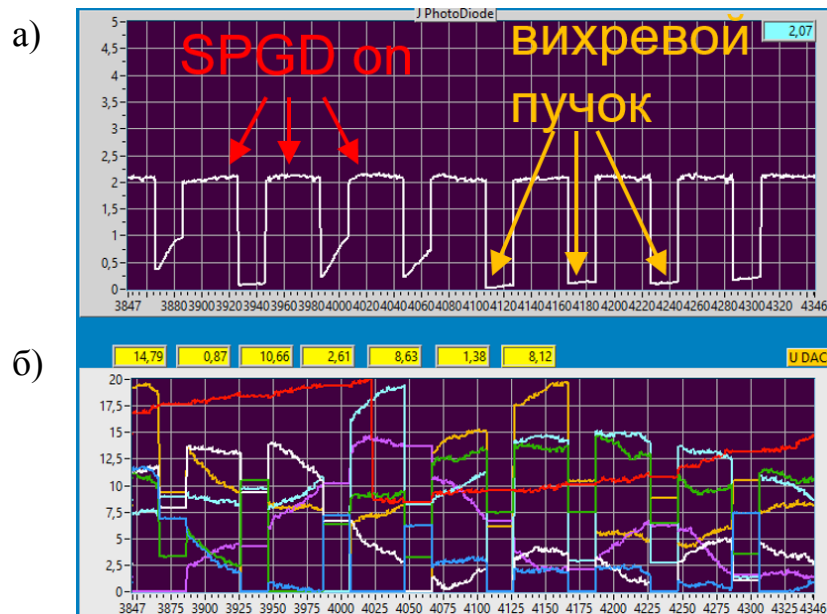


Рисунок 2.16 - Динамика изменения осевой интенсивности излучения в плоскости фокусировки (сигнала на фотодетекторе, используемого для обратной связи) (а), а также управляющего напряжения на фазосдвигателях (б)

На рис. 2.16 а верхний уровень кривой изменения осевой интенсивности излучения в плоскости фокусировки соответствует когерентному сложению шести пучков методом SPGD. Нижний уровень данной кривой соответствует равномерному сдвигу фазы на соседних субапертурах на величину  $2\pi/6$  во время сохранения стационарного фазового состояния, с целью формирования вихревого синтезированного пучка.

Видно, что во время работы управляющего контроллера по методу SPGD происходит изменение фазы в каждом канале распространения с целью компенсации случайных фазовых набегов (рис.2.16 б). В момент сдвига фазы на соседних субапертурах на величину  $2\pi/6$  с целью формирования вихревого пучка происходит существенное падение сигнала на фотодетекторе (на уровень  $< 3\%$  от предельного значения), характеризующего осевую интенсивности излучения в плоскости фокусировки. В этот момент на протяжении всего времени отсутствия управления регистрируются кольцеобразные распределения интенсивности излучения, соответствующие вихревому пучку (рис. 2.15).

При этом можно отметить, что во время сдвига фазы на соседних субапертурах на величину  $2\pi/6$  с целью формирования вихревого пучка иногда ре-

ализуются ситуации, при которых падение сигнала на фотодетекторе не достигает уровня в 3% от предельного значения (первое, третье и четвертое падение сигнала (рис. 2.16 а). Это можно объяснить двумя причинами. Во-первых, могут возникнуть ситуации, когда при управлении фазой методом SPGD текущее состояние фазосдвигателя не позволяет осуществить дополнительный сдвиг фазы на заданное значение из-за ограниченности своего рабочего диапазона. Во-вторых, размер области дислокации, в пределах которой значение интенсивности близко к нулю составляет порядка размера апертуры приемного фотодетектора. А при небольших погрешностях в сдвиге фазы на соседних фазосдвигателях происходит некоторое смещение области дислокации относительно оси синтезированного пучка, на которой расположен фотодетектор.

Однако можно отметить, что кольцевое распределение интенсивности излучения не является достаточным условием доказательства образования оптического вихря. Обязательным условием идентификации вихревого пучка является наличие циркуляционной составляющей в распределении вектора Умова-Пойнтинга. На рис.2.17 представлены, рассчитанные на основе измерений датчика Шака-Гартмана, распределения интенсивности поля и локальных наклонов волнового фронта вихревого синтезированного пучка. В данном случае вектор локальных наклонов волнового фронта представляет собой тангенсальную (по отношению к оси распространения синтезированного пучка) составляющую нормированного вектора Умова-Пойнтинга. Видно, что в центральной части наблюдается циркуляция направлений локальных наклонов волнового фронта вокруг некоторой точки. При этом данная точка соответствует минимальному (близкому к нулевому) значению интенсивности излучения в приосевой области. Можно отметить, что в ситуациях, когда область дислокации (положение нуля интенсивности, вокруг которого образуется циркуляция вектора локальных наклонов волнового фронта) смещается относительно оси синтезированного пучка, в распределении вектора локальных наклонов волнового фронта наблюдается циркуляция относительно точки, расположенной

между четырьмя соседними пикселями (микролинзами) датчика Шака-Гартмана.

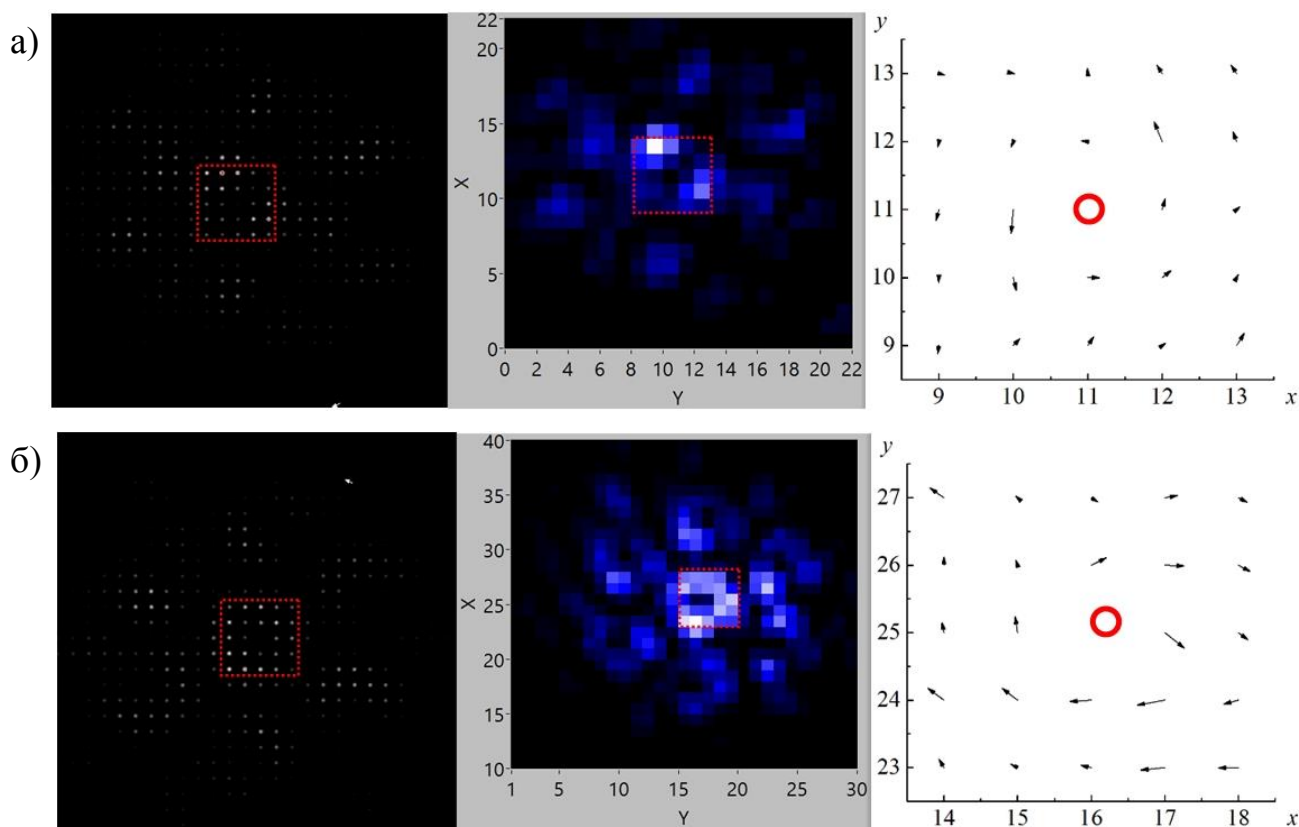


Рисунок 2.17 - Реализации распределения интенсивности излучения с ОУМ +1 (а) и  $-1$  (б), на фотоприемной матрице датчика Шака-Гартмана для синтезированных вихревых пучков (слева), а также рассчитанное распределение интенсивности поля (в центре) и локальных наклонов волнового фронта вихревого синтезированного пучка (справа). Локальные наклоны волнового фронта соответствуют области выделенной красным прямоугольником. По осям отложены номера микролинз датчика Шака-Гартмана. Красным кружком обозначена область дислокации волнового фронта

Известно, что орбитальный угловой момент вихревых пучков может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Смена знака орбитального углового момента вихревого пучка приводит к смене направления вращательного движения энергии вокруг оси вихревого пучка на противоположное. На рис. 2.17 представлены две реализации распределения интенсивности излучения на фотоприемной матрице датчика Шака-Гартмана, а также рассчитанного распределения интенсивности поля и локальных наклонов волново-

го фронта вихревого синтезированного пучка, соответствующие положительному и отрицательному значению ОУМ. Видно, что циркуляция направлений локальных наклонов волнового фронта вокруг центральной точки меняется, при смене начального сдвига фаз на соседних субапертурах синтезированного пучка на противоположное. Это демонстрирует возможность управления значением ОУМ вихревого пучка в рамках созданного макета системы формирования синтезированных лазерных пучков.

Выводы по полученным результатам:

1. Экспериментально продемонстрирована возможность формирования скалярных вихревых пучков обладающих ОУМ, путём фазирования матрицы волоконных лазеров;
2. Управление фазовыми характеристиками синтезированного пучка путем когерентного сложения (фазировки) излучения и обеспечения заданного фазового сдвига на соседних субапертурах, расположенных по кругу, позволяет генерировать вихревые пучки с изменяемым значением ОУМ.
3. При когерентном сложении излучения матрицы оптоволоконных излучателей независимо от числа субапертур значение интенсивности излучения на оси синтезированного пучка в плоскости фокусировки излучения возрастает пропорционально квадрату числа субапертур. При некогерентном сложении излучения форма суммарного пучка совпадает с формой пучка, сформированного единственной субапертурой. При этом значение интенсивности излучения на оси в плоскости фокусировки изменяется пропорционально числу складываемых субапертур.

### 3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

#### 3.1 Предпроектный анализ

##### 3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Результатом исследования является получение оптического вихревого пучка в системе когерентного сложения пучков пучки с дислокацией в центре (на оси) с топологическим зарядом  $l=1$  и  $l=2$ . Данные исследования проводились в ЗАО «Научно-внедренческое предприятие «ТОПАЗ» совместно с Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

Потребителями результатов исследования могут быть крупные средние и мелкие организации, частные и физические лица. Сегментирование рынка проводилось по двум категориям: по способу создания и по области применения оптических вихревых пучков (табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Карта сегментирования

| Способ<br>создания<br>Область<br>применения  | Спектральное<br>суммирование<br>пучков | Когерентное<br>суммирование<br>пучков | Электронный ана-<br>лог пучка (мате-<br>матическое моде-<br>лирование) |
|--|--|---------------------------------------|--|
| Беспроводная пере-<br>дача энергии   | А                                      | Б                                     | А/Б  |
| Беспроводная опти-<br>ческая связь   | А                                      | Б                                     |  |
| Лазерная обработка<br>материалов   |  | Б                                     |  |
| А – ЗАО «НВП «Топаз» совместно с Институтом оптики атмосферы им.<br>В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск<br>Б – Учёные из Шведского института физики космоса и Университета<br>Падуй (Италия) |  |                                       |  |

В приведенной карте сегментирования показано, какие ниши на рынке услуг по разработке оптических вихревых пучков и их применениям не заняты. В нашем случае важен способ создания таких пучков. Из карты сегментирования видно, что созданием оптических вихревых пучков методом когерентного суммирования занимается одно предприятие – ЗАО НВП «Топаз». Помимо этого, данное направление в настоящее время развивается для решения задач прямой передачи энергии и беспроводной оптической связи, насколько нам из-

вестно, не рассматривалось ранее с точки зрения возможности создания систем для лазерной обработки материалов

### 3.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Для оценки конкурентоспособности исследования было выбрано два метода получения оптических вихревых пучков: когерентное (КС) и спектральное суммирование пучков (СС) (табл.3.2).

Таблица 3.2- Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

| Критерии   | Вес   | Балл |    | Конкурентоспособность |             |
|--|-------|------|----|-----------------------|-------------|
|  |       | КС   | СС | КС                    | СС          |
| Технические критерии оценки ресурсоэффективности         |       |      |    |                       |             |
| 1. Повышение производительности труда пользователя       | 0,055 | 3    | 3  | 0,165                 | 0,165       |
| 2. Удобство в эксплуатации                               | 0,08  | 5    | 2  | <b>0,4</b>            | 0,16        |
| 3. Помехоустойчивость                                    | 0,08  | 3    | 3  | 0,24                  | 0,24        |
| 4. Энергоэкономичность                                   | 0,05  | 3    | 4  | 0,15                  | <b>0,2</b>  |
| 5. Надежность  | 0,07  | 5    | 3  | <b>0,35</b>           | 0,21        |
| 6. Уровень шума  | 0,025 | 3    | 4  | 0,075                 | <b>0,1</b>  |
| 7. Безопасность  | 0,055 | 1    | 1  | 0,055                 | 0,055       |
| 8. Потребность в ресурсах памяти                         | 0,03  | 3    | 3  | 0,09                  | 0,09        |
| 9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности) | 0,08  | 5    | 3  | <b>0,4</b>            | 0,24        |
| 10. Простота эксплуатации                                | 0,08  | 5    | 2  | <b>0,4</b>            | 0,16        |
| 11. Качество интеллектуального интерфейса                | 0,075 | 5    | 4  | <b>0,375</b>          | 0,3         |
| 12. Возможность подключения в сеть ЭВМ                   | 0,065 | 5    | 4  | <b>0,325</b>          | 0,26        |
| Экономические критерии оценки эффективности              |       |      |    |                       |             |
| 1. Конкурентоспособность продукта                        | 0,035 | 5    | 5  | 0,175                 | 0,175       |
| 2. Уровень проникновения на рынок                        | 0,025 | 3    | 3  | 0,075                 | 0,075       |
| 3. Цена  | 0,04  | 2    | 3  | 0,08                  | <b>0,12</b> |
| 4. Предполагаемый срок эксплуатации                      | 0,03  | 4    | 2  | <b>0,12</b>           | 0,06        |
| 5. Послепродажное обслуживание                           | 0,03  | 3    | 3  | 0,09                  | 0,09        |
| 6. Финансирование научной разработки                     | 0,075 | 3    | 3  | 0,225                 | 0,225       |
| 7. Срок выхода на рынок                                  | 0,02  | 2    | 2  | 0,04                  | 0,04        |
| Итого  | 1     |      |    | <b>3,83</b>           | 2,965       |

Исходя из табл. 3.2, метод когерентного суммирования пучков выигрывает по 8 критериям, причем значительно преобладают 5 критериев, это: удобство в эксплуатации, надежность, функциональная мощность (предоставляемые возможности), простота эксплуатации, предполагаемый срок эксплуатации. Слабыми сторонами этого метода являются энергоэкономичность, уровень шума и цена. По остальным критериям оба метода являются одинаково конкурентоспособными.

По итогам табл. 3.2 наиболее конкурентоспособным является метод когерентного суммирования пучков волоконных лазеров.

### 3.1.3 SWOT-анализ

В табл. 3.3 описаны сильные и слабые стороны проекта и выявлены возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней и внутренней среде.

Предприятие характеризуется преобладанием сильных сторон над слабыми, что выявляет широкий спектр новых возможностей при отсутствии угроз. Предприятие должно предпринимать действия по укреплению своей позиции на рынке. Оно должно сотрудничать с другими организациями, внедрять результаты исследования на производстве, приобретать новое оборудование для более качественного выпуска новой продукции, для повышения производительности на предприятии должен работать квалифицированный персонал. Однако все перечисленное вызывает дополнительные затраты на покупку и обслуживание нового оборудования. Выход других компаний с одной стороны вызовет увеличение производительности, с другой стороны приведет к новым затратам. В том числе и на сертификацию продукции [13].

Таблица 3.3 – SWOT-анализ

|   |  |  |
|---|--|--|
|   | <p>Сильные стороны</p> <p>С1. Квалифицированный персонал.</p> <p>С2. Наличие необходимого оборудования для проведения исследований.</p> <p>С3. Финансирование проекта.</p> <p>С4. Отсутствие данной технологии на рынке.</p> <p>С5. Наличие качественного интеллектуального интерфейса.</p> <p>С6. Надежность установки.</p> <p>С7. Возможность быстрого изменения распределения интенсивности пучка.</p>  | <p>Слабые стороны</p> <p>Сл1. Стоимость оборудования.</p> <p>Сл2. Затраты на электроэнергию.</p> <p>Сл3. Предъявление особых требований к помещениям, где проводятся эксперименты, связанные с лазерным излучением.</p> <p>Сл4. Сложность в юстировке оптической системы.</p>  |
| <p>Возможности:</p> <p>В1. Сотрудничество с другими организациями.</p> <p>В2. Появление спроса на новый продукт.</p> <p>В3. Получение высокой плотности мощности, при дифракционном размере пучка.</p> <p>В4. Внедрение результатов исследования на производстве.</p>   | <p>Сотрудничество с другими организациями позволит увеличить количество квалифицированного персонала, так же дает возможность использовать дополнительно оборудование для проведения исследований. Так же со стороны других организаций возможно дополнительное финансирование проекта.</p> <p>Появление спроса на новый продукт связано с отсутствием такой технологии на рынке, с наличием качественного интеллектуального интерфейса, с надежностью установки и возможностью быстрого изменения распределения интенсивности пучка.</p> <p>Получение высокой плотности мощности, при дифракционном размере пучка отсутствует на рынке.</p> | <p>Появление спроса на новый продукт увеличит затраты на электроэнергию.</p> <p>Получение высокой плотности мощности, при дифракционном размере пучка и внедрение результатов исследования на производстве влечет за собой предъявление особых требований к помещениям, где проводятся эксперименты, связанные с лазерным излучением.</p>  |
| <p>Угрозы:</p> <p>У1. Выход на рынок других методов получения вихревых пучков.</p> <p>У2. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции.</p> <p>У3. Отсутствие спроса на новые технологии производства.</p> <p>У4. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства.</p> | <p>Выход на рынок других методов получения вихревых пучков, повысит качество интеллектуального интерфейса, надежность установки.</p> <p>Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции повысит требования к квалификации персонала, повысит надежность установки.</p>   | <p>Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции может быть связано с предъявление особых требований к помещениям, где используется лазерное излучение.</p> <p>Предъявление особых требований к помещениям, где используется лазерное излучение, и сложность в юстировке оптической системы может привести к отсутствию спроса на новые технологии</p> |



### 3.1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации

Оценим степень готовности научной разработки к коммерциализации. В табл. 3.4 отражены вопросы и показатели степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта.

Таблица 3.4 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации [13]

| №  | Наименование  | Степень проработанности научного проекта | Уровень имеющихся знаний у разработчика |
|----|---|--|---|
| 1  | Определен имеющийся научно-технический задел                                      | 5  | 5                                       |
| 2  | Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела  | 3  | 3                                       |
| 3  | Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке         | 5  | 4                                       |
| 4  | Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок   | 3  | 3                                       |
| 5  | Определены авторы и осуществлена охрана их прав                                   | 4  | 4                                       |
| 6  | Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности                         | 3  | 2                                       |
| 7  | Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта                                 | 4  | 3                                       |
| 8  | Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки                        | 2  | 2                                       |
| 9  | Определены пути продвижения научной разработки на рынок                           | 3  | 2                                       |
| 10 | Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки                       | 4  | 3                                       |
| 11 | Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок    | 2  | 2                                       |
| 12 | Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот | 4  | 3                                       |
| 13 | Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки            | 5  | 4                                       |
| 14 | Имеется команда для коммерциализации научной разработки                           | 4  | 3                                       |
| 15 | Проработан механизм реализации научного проекта                                   | 3  | 3                                       |
|    | <b>Итого баллов</b>   | <b>54</b>                                | <b>45</b>                               |

Суммарное количество баллов степени проработанности научного проекта и уровня имеющихся знаний у разработчика, составляют 54 и 45 соответственно. Эти значения позволяют говорить о перспективности научной разработки выше среднего. Тем не менее, произведенная оценка готовности научной разработки требует дальнейшего совершенствования заготовки проекта, а, возможно, и более глубоких исследований в области маркетинга.

Команда, выполняющая данный проект обладает всеми необходимыми компетенциями и решениями, оформленными в режиме KNOW-HOW.

### 3.2 Инициация проекта

Реализация любого проекта преследует какую-либо определенную цель, то есть то, ради чего и был создан проект. Неправильно определенные цели и задачи, или цели без задач, приводят к тому, что в процессе реализации проекта возникают перерасход средств, конфликты между членами проектной команды, несоблюдение контрольных промежуточных пунктов и, как следствие, недовольство доноров проекта. Цель в большей степени представляет собой декларацию о намерениях, из которой должно быть ясно, в чем состоит важность проекта для общества [13].

Таблица 3.5 – Заинтересованные стороны проекта

| Заинтересованные стороны проекта  | Ожидания заинтересованных сторон  |
|---|---|
| ЗАО «Научно-внедренческое предприятие «ТОПАЗ»;<br>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск | Получение оптических вихревых пучков методом когерентного суммирования пучков волоконных лазеров, которые могут быть использованы для беспроводной оптической связи и передачи энергии на большие расстояния, а также для обработки материалов. |

Таблица 3.6 - Цели и результат проекта

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| Цели проекта:                        | Исследование возможностей создания оптически вихревых пучков, обладающих нулевой интенсивностью в центре пучка, используя методы фазирования, которые применяются в задачах когерентного суммирования лазерных пучков.  |
| Ожидаемые результаты проекта:        | Получение оптических вихревых пучков методом когерентного суммирования пучков волоконных лазеров, которые могут быть использованы для беспроводной оптической связи и передачи энергии на большие расстояния, а также для обработки материалов.   |
| Критерии приемки результата проекта: | Разработка и изготовление макета технологической системы суммарной мощностью 0,5 ÷ 1,0 кВт. Разработка технологий резки и сварки металла. Исследование различных режимов управления лазерным пучком с точки зрения технологических применений.  |
| Требования к результату проекта:     | <p>Выходная мощность лазерного излучения после когерентного суммирования: 0,5 – 1,0 кВт;</p> <p>Качество пучка: <math>M^2 = 1,4</math>;</p> <p>Дистанция фокусировки: 1,0 – 10,0 м;</p> <p>Достижимая плотность мощности в области фокусировки:</p> <p>при <math>P = 0,5</math> кВт, <math>D = 150</math> мм, <math>F = 1000</math> мм, <math>W = 1,47 \times 10^8</math> Вт/см<sup>2</sup>;</p> <p>при <math>P = 1,0</math> кВт, <math>D = 150</math> мм, <math>F = 10000</math> мм, <math>W = 1,47 \times 10^6</math> Вт/см<sup>2</sup>;</p> <p>при <math>P = 0,5</math> кВт, <math>D = 150</math> мм, <math>F = 1000</math> мм, <math>W = 2,94 \times 10^8</math> Вт/см<sup>2</sup>;</p> <p>при <math>P = 1,0</math> кВт, <math>D = 150</math> мм, <math>F = 10000</math> мм, <math>W = 2,94 \times 10^6</math> Вт/см<sup>2</sup>;</p> <p>Максимальный угол сканирования: <math>\pm 3</math> мрад;</p> <p>Максимальная частота сканирования: 2 кГц;</p> <p>Максимальный вес мобильной части: 30 кг</p> |

Таблица 3.7 - Рабочая группа проекта

| № п/п  | ФИО, основное место работы, должность                              | Роль в проекте         | Функции  | Трудовые затраты, час. |
|--------|--|------------------------|--|------------------------|
| 1      | Михаил Ефимович Левицкий<br>Генеральный директор ЗАО «НВП «Топаз»» | Руководитель проекта   | 1. Консультации по реализации проекта.<br>2. Согласование, проверки, контроль выполнения проекта | 100                    |
| 2      | Ольга Сергеевна Кролевец<br>Магистрант                             | Исполнитель по проекту | 1. Выполнение заданий по реализации проекта;<br>2. Описание результатов проекта.                 | 500                    |
| ИТОГО: |  |                        |  | 600                    |

### 3.3 Планирование управления научно-техническим проектом



Рисунок 3.1. - Иерархическая структура работ по проекту

Таблица 3.8 Контрольные события проекта

| № п/п | Контрольное событие   | Дата     | Результат (подтверждающий документ)   |
|-------|---|----------|---|
| 1     | Постановка задачи исследования  | 15.10.15 | Определены цели и задачи исследования   |
| 2     | Обзорная часть. Способы управления распределением интенсивности в лазерных пучках. Эффективные формы распределения интенсивности лазерного пучка для задач лазерной обработки материалов. | 01.06.16 | Произведен обзор литературы, публикаций и научных исследований по теме магистерской диссертации. Обозначены наиболее часто возникающие проблемы и сложности в процессе проведения исследований. |
| 3     | Экспериментальная часть: Формирование распределения интенсивности в системе когерентного суммирования пучков волоконных лазеров.  | 01.03.17 | Изучена экспериментальная установка.<br>Отработаны навыки юстировки оптической системы.<br>Изучены программные продукты, отображающие информацию о пучках.                                      |
| 4     | Обсуждение результатов исследования.  | 15.05.17 | Подведены итоги в соответствии с поставленными задачами и полученными результатами.<br>Оформлены полученные результаты в виде магистерской диссертации.   |

Таблица 3.9 - Календарный план проекта

| Код   | Название   | Дни | Дата нача-<br>ла работ | Дата окон-<br>чания работ | Состав участ-<br>ников      |
|-------|--|-----|------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 1     | Оценка текущего состояния аналогов проекта               |     |                        |                           |                             |
| 1.1   | Установка ожидаемых результа-<br>тов                     | 5   | 05.10.2015             | 15.10.2015                | 1 Руководитель<br>2 Студент |
| 1.2   | Требования к системе и качеству<br>пучка                 |     |                        |                           | 1 Руководитель<br>2 Студент |
| 1.3   | Установка сроков выполнения<br>проекта                   |     |                        |                           | 1 Руководитель<br>2 Студент |
| 2     | Теоретическое исследование                               |     |                        |                           |                             |
| 2.1   | Обзор литературы   | 20  | 16.10.2015             | 01.06.2016                | 2 Студент                   |
| 2.2   | Обзор методов получения вихре-<br>вых пучков             | 20  |                        |                           | 2 Студент                   |
| 3     | Экспериментальная установка                              |     |                        |                           |                             |
| 3.1   | Используемое оборудование                                | 10  | 27.06.2016             | 03.08.2016                | 2 Студент                   |
| 3.2   | Юстировка системы  | 20  | 15.09.2016             | 30.12.2016                | 1 Руководитель<br>2 Студент |
| 3.3   | Формирование вихревого пучка                             | 20  | 28.01.17               | 01.03.17                  | 1 Руководитель<br>2 Студент |
| 4     | Социальная ответственность                               |     |                        |                           |                             |
| 4.1   | Выявление опасных и вредных<br>факторов                  | 2   | 12.04.2017             | 30.04.2017                | 2 Студент                   |
| 4.2   | Экологическая безопасность                               | 2   |                        |                           | 2 Студент                   |
| 4.3   | Безопасность в ЧС  | 2   |                        |                           | 2 Студент                   |
| 4.4   | Правовые вопросы   | 2   |                        |                           | 2 Студент                   |
| 5     | Финансовый менеджмент                                    |     |                        |                           |                             |
| 5.1   | Предпроектный анализ                                     | 2   | 01.05.2017             | 15.05.2017                | 2 Студент                   |
| 5.2   | Инициация проекта  | 2   |                        |                           | 2 Студент                   |
| 5.3   | Планирование управления науч-<br>но-техническим проектом | 2   |                        |                           | 2 Студент                   |
| Итого |  | 109 |                        |                           |                             |

Таблица 3.10 – Календарный план-график проведения работы по теме

| Содержание работ                                       | Дол<br>жнос<br>ть |               | Продолжительность выполнения работ |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  |                        |  |                        |  |  |  |
|--|-------------------|---------------|------------------------------------|-------|-------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|--|------------------------|--|------------------------|--|--|--|
|  |                   | Месяц,<br>год | 10.16                              | 06.16 | 07.16 | 08.16                  | 09.16 | 10.16 | 11.16 | 12.16 | 02.17 | 03.17 | 04.17 | 05.7 | 06.17 |  |                        |  |                        |  |  |  |
|  |                   | Дни           |                                    |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  |                        |  |                        |  |  |  |
| Оценка текущего состояния аналогов проекта             |                   |               |                                    |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  |                        |  |                        |  |  |  |
| Установка ожидаемых резуль-<br>татов                   | Р, С              | 5             | <div><div></div><div></div></div>  |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  |                        |  |                        |  |  |  |
| Требования к системе и каче-<br>ству пучка             | Р, С              |               | <div><div></div><div></div></div>  |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  |                        |  |                        |  |  |  |
| Установка сроков выполнения<br>проекта                 | Р, С              |               | <div><div></div><div></div></div>  |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  |                        |  |                        |  |  |  |
| Теоретическое исследование                             |                   |               |                                    |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  |                        |  |                        |  |  |  |
| Обзор литературы                                       | С                 | 20            | <div><div></div></div>             |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  |                        |  |                        |  |  |  |
| Обзор методов получения вих-<br>ревых пучков           | С                 | 20            | <div><div></div></div>             |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  |                        |  |                        |  |  |  |
| Экспериментальная установка                            |                   |               |                                    |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  |                        |  |                        |  |  |  |
| Используемое оборудование                              | С                 | 10            |                                    |       |       | <div><div></div></div> |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  |                        |  |                        |  |  |  |
| Юстировка системы                                      | Р, С              | 20            |                                    |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  |                        |  |                        |  |  |  |
| Формирование вихревого пучка                           | Р, С              | 20            |                                    |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  |                        |  |                        |  |  |  |
| Социальная ответственность                             |                   |               |                                    |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  |                        |  |                        |  |  |  |
| Выявление опасных и вредных<br>факторов                | С                 | 2             |                                    |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  | <div><div></div></div> |  |                        |  |  |  |
| Экологическая безопасность                             | С                 | 2             |                                    |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  | <div><div></div></div> |  |                        |  |  |  |
| Безопасность в ЧС                                      | С                 | 2             |                                    |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  | <div><div></div></div> |  |                        |  |  |  |
| Правовые вопросы                                       | С                 | 2             |                                    |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  | <div><div></div></div> |  |                        |  |  |  |
| Финансовый менеджмент                                  |                   |               |                                    |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  |                        |  |                        |  |  |  |
| Предпроектный анализ                                   | С                 | 2             |                                    |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  |                        |  | <div><div></div></div> |  |  |  |
| Инициация проекта                                      | С                 | 2             |                                    |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  |                        |  |                        |  |  |  |
| Планирование управления<br>научно-техническим проектом | С                 | 2             |                                    |       |       |                        |       |       |       |       |       |       |       |      |       |  |                        |  |                        |  |  |  |

### 3.4. Бюджет научного исследования

Таблица 3.11 - Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

| Наименование                               | Марка, размер | Кол-во | Цена за единицу, руб. | Сумма, руб. |
|--|---------------|--------|-----------------------|-------------|
| Канцелярские принадлежности                | комплект      | 1      | 1000                  | 1000        |
| Бумага                                     | шт            | 2      | 300                   | 600         |
| Флэш-накопитель                            | шт            | 1      | 450                   | 450         |
| Картридж для принтера                      | заправка      | 1      | 250                   | 250         |
| Всего за материалы                         |               |        |                       | 2300        |
| Транспортно-заготовительные расходы (3-5%) |               |        |                       | 69          |
| Итого по статье См                         |               |        |                       | 2369        |

Таблица 3.12 - Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

| Наименование                               | Марка, размер   | Кол-во | Цена за единицу, руб. | Сумма, руб. |
|--|-----------------|--------|-----------------------|-------------|
| Камера                                     | SP503U          | 1      | 256502                | 256502      |
| Датчик Шака-Гартмана                       | WFS150-5C       | 1      | 226503                | 226503      |
| Волоконно-оптическая фазосдвигающая ячейка | FPS-002         | 7      | 5649                  | 45481       |
| Волоконно-оптический разъединитель         | PMC-P-1x2       | 1      | 2824                  | 2824        |
| Волоконно-оптический разъединитель         | PMC-P-1x4       | 2      | 2824                  | 5649        |
| Узкополосный лазер                         | LD-1064-DBR-150 | 1      | 226757                | 226757      |
| Драйвер для лазерных диодов                | Innolume        | 1      | 230607                | 230607      |
| Итого по статье См                         |                 |        |                       | 994323      |

Рассчитаем стоимость использования экспериментальной установки в виде амортизационных отчислений линейным способом.

Стоимость установки составляет 1 000 000 руб. Полезный срок использования установки (П.с.и.вл). составляет 5 лет.

Рассчитаем годовую норму амортизации ( $N_{\text{вл}}$ ) по формуле

$$N_k = \frac{100\%}{П.с.и.вл} = \frac{100}{5} = 20\%$$

Тогда ежегодная сумма амортизационных отчислений (Ам.о.г.вл) будет составлять:

$$Ам.о.г.вл = N_{БЛ} \cdot Ст.вл = 20\% \cdot 1\,000\,000 = 200\,000 \text{ руб.}$$

Ежемесячная сумма амортизационных отчислений (Ам.о.м.вл) будет равна:

$$Ам.о.м.вл = \frac{Ам.о.г.вл}{12} = \frac{200000}{12} = 16666$$

Так как на данный момент исследование проводилось 21 месяц, то общая сумма амортизационных отчислений (Ам.о.общ.) равна

$$Ам.о.общ. = Ам.о.м.вл \cdot 21 = 16666 \cdot 21 = 349986 \text{ руб.}$$

Для расчета заработной платы будем исходить из того, что в составе рабочей группы у нас находятся 2 человека: исполнитель (студент) в качестве лаборанта ТПУ, руководитель (научный руководитель). Из календарного плана графика найдем занятость каждого из участников.

В таблице 3.13 приведен расчет заработной платы по данному проекту, учитывая различные коэффициенты и базовый оклад каждого из работников.

Таблица 3.13 - Расчёт основной заработной платы

| Исполнители  | З <sub>б</sub> ,<br>руб. | k <sub>пр</sub> | k <sub>д</sub> | k <sub>р</sub> | З <sub>м</sub> ,<br>руб | З <sub>дн</sub> ,<br>руб. | Т <sub>р</sub> ,<br>раб.<br>дн. | З <sub>осн</sub> ,<br>руб. |
|--------------|--------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Руководитель | 23264,86                 | 0               | 0              | 1,3            | 30244,32                | 1252,1                    | 45                              | 56344,5                    |
| Исполнитель  | 14847,45                 | 0               | 0              | 1,3            | 19301,69                | 486,72                    | 109                             | 53052,48                   |

В данном исследовании дополнительная заработная плата не предусматривается. Итого по данной статье предусматривается финансирование в размере  $C_{зн} = 109396,98 \text{ руб.}$

Отчисления на социальные нужды. Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot 109396,98 = 32819,09 \text{ руб.}$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).



Определение бюджета затрат на исследование по каждому исполнителю приведен в табл. 3.14.

Таблица 3.14 – Бюджет проекта

| Наименование статьи                                    | Сумма, руб. |                      |
|--|-------------|----------------------|
|  | м.с.н.      | Научный руководитель |
| Материальные затраты                                   | 2369        |                      |
| Оплата труда   | 53052,48    | 56344,5              |
| Отчисления во внебюджетные фонды                       | 32819,09    |                      |
| Амортизационные отчисления                             | 349986      |                      |
| Прочие неучтенные расходы, $(10\% \cdot \sum(ЗМ))$     | 236,9       |                      |
| Накладные расходы, $(140\% \cdot \text{оплаты труда})$ | 153155.8    |                      |
| Бюджет затрат НТИ                                      | 2025963,77  |                      |

### 3.5 Реестр рисков проекта

Возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать влекущие за собой нежелательные последствия, сведены в табл. 3.15.

Таблица 3.15 - Реестр рисков

| № | Риск   | Потенциальное воздействие  | Вер-<br>-ть | Вли-<br>-ян | Уро-<br>-вень | Способы смяг-<br>-чения  | Условия<br>наступления  |
|---|--|--|-------------|-------------|---------------|--|---|
| 1 | Неблагоприятная политика руководства исследования            | Отказ от выполнения работ по рассматриваемому исследованию   | 1           | 1           | Низ.          | Обоснование необходимости проведения исследования                        | При появлении более эффективных исследований  |
| 2 | Разработка подобных проектов другими организациями           | Невозможность внедрения данного исследования, связанная с его неактуальностью по предложенной проблеме | 2           | 2           | Низ.          | Разработка наиболее эффективной, простой и дешевой схемы по исследованию | В случае необходимости  |
| 3 | Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования | Может привести к увеличению сроков выполнения исследований   | 3           | 3           | Ср.           | Поиск и привлечение спонсоров исследования                               | Невыполнение работы в соответствии с планом. Отсутствие финансового обеспечения у спонсоров |

### 3.6 Определение ресурсной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя ресурсоэффективности научного исследования (табл. 3.16).

Таблица 3.16 - Определение ресурсной эффективности исследования

| Критерии оценки  | Вес критерия | Когерентное суммирование пучков |             | Спектральное суммирование пучков |         |
|--|--------------|---------------------------------|-------------|----------------------------------|---------|
|  |              | Баллы                           | (2)·(3)     | Баллы                            | (2)·(5) |
| 1  | 2            | 3                               | 4           | 5                                | 6       |
| 1. Повышение производительности труда пользователя       | 0,055        | 3                               | 0,165       | 3                                | 0,165   |
| 2. Удобство в эксплуатации                               | 0,08         | 5                               | 0,4         | 2                                | 0,16    |
| 3. Помехоустойчивость                                    | 0,08         | 3                               | 0,24        | 3                                | 0,24    |
| 4. Энергоэкономичность                                   | 0,05         | 3                               | 0,15        | 4                                | 0,2     |
| 5. Надежность  | 0,07         | 5                               | 0,35        | 3                                | 0,21    |
| 6. Уровень шума  | 0,025        | 3                               | 0,075       | 4                                | 0,1     |
| 7. Безопасность  | 0,055        | 1                               | 0,055       | 1                                | 0,055   |
| 8. Потребность в ресурсах памяти                         | 0,03         | 3                               | 0,09        | 3                                | 0,09    |
| 9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности) | 0,08         | 5                               | 0,4         | 3                                | 0,24    |
| 10. Простота эксплуатации                                | 0,08         | 5                               | 0,4         | 2                                | 0,16    |
| 11. Качество интеллектуального интерфейса                | 0,075        | 5                               | 0,375       | 4                                | 0,3     |
| 12. Ремонтопригодность                                   | 0,06         | 3                               | 0,18        | 2                                | 0,12    |
| 13. Конкурентоспособность продукта                       | 0,035        | 5                               | 0,175       | 5                                | 0,175   |
| 14. Уровень проникновения на рынок                       | 0,025        | 3                               | 0,075       | 3                                | 0,075   |
| 15. Перспективность рынка                                | 0,035        | 3                               | 0,105       | 2                                | 0,07    |
| 16. Цена   | 0,04         | 2                               | 0,08        | 3                                | 0,12    |
| 17. Послепродажное обслуживание                          | 0,03         | 3                               | 0,09        | 3                                | 0,09    |
| 18. Финансовая эффективность научной разработки          | 0,075        | 3                               | 0,225       | 3                                | 0,225   |
| 19. Срок выхода на рынок                                 | 0,02         | 2                               | 0,04        | 2                                | 0,04    |
| Итого  | 1            | 65                              | <b>3,67</b> | 55                               | 2,835   |

Из табл. 3.16 видно, что наиболее эффективный вариант решения в поставленной задаче ВКР с позиции ресурсоэффективности является метод когерентного суммирования пучков волоконных лазеров.

Бюджет научно-технического исследования составил 2 026 000 р.

## 4 Социальная ответственность

### Введение

В данной работе рассмотрено экспериментальное исследование возможностей создания пучков с различным распределением интенсивности, в частности оптически вихревых (ОВ) пучков, обладающих нулевой интенсивностью в центре пучка, используя методы фазирования, которые применяются в задачах когерентного суммирования лазерных пучков.

Непрерывное расширение применения лазерных пучков в различных областях человеческой деятельности ведет к увеличению исследований, и как следствие к росту инженеров, исследователей, а также обслуживающего персонала. Как и многое другое оборудование, применяемое человеком для различных целей, экспериментальные исследования лазерных пучков представляют определенную опасность для здоровья человека.

В экспериментальной установке используется узкополосный лазер мощностью 150 мВт и с длиной волны 1064 нм, такое излучение является невидимым для человеческого глаза, поэтому может представлять некоторую опасность для здоровья человека.

Лазерное излучение (ЛИ) не представляет такой опасности, как загрязнение воздуха химическими и радиоактивными веществами или генерация радиоволн высоких и сверхвысоких частот. Но потенциальной опасностью является прямое и отраженное ЛИ на организм человека. В том числе человек может подвергаться комбинированному воздействию различных опасных и вредных производственных факторов.

В данной работе в качестве рабочего места рассматривается лаборатория, которая находится в микрорайоне Академгородок в городе Томске. Данная лаборатория основана на базе лаборатории лазерных технологий в ЗАО «Научно-внедренческое предприятие «ТОПАЗ». Объектом исследования являются приборы и оборудование, исследуемый лазерный пучок.

#### 4.1. Производственная безопасность

Исследование лазерных пучков в лабораторных условиях связано с вопросами защиты инженеров, исследователей и обслуживающего персонала от прямого и отраженного излучения, а также других факторов, влияние которых может оказывать вредное воздействие на здоровье человека. В зависимости от типа, конструкции и целевого назначения лазеров, на обслуживающий персонал могут воздействовать опасные и вредные факторы [14].

##### 4.1.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

В табл. 4.1 приведены вредные и опасные факторы при проведении экспериментальных исследований по возможности создания лазерных оптических вихревых пучков.

Таблица 4.1 – Вредные и опасные факторы при проведении экспериментальных исследований

| Источник фактора, наименование видов работ   | Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)   |                     | Нормативные документы   |
|--|---|---------------------|---|
|  | Вредные   | Опасные             |   |
| Юстировка лазерной системы и проведение экспериментов:<br>- наблюдение за изменением пучка при юстировке экспериментальной лазерной установки и обработка результатов за компьютером;<br>- транспортировка лазерного излучения по оптическому тракту от лазера;<br>- управление фазосдвигающими ячейками посредством контроллера, которые используются для сдвига фазы пучков. | - повышенный уровень шума на рабочем месте;<br>- недостаточная освещенность рабочей зоны;<br>- отклонение показателей микроклимата в помещении;<br>- нервно-психические перегрузки<br>- повышенный уровень электромагнитных излучений | - электрический ток | ГОСТ 12.0.003-2015 [1];<br>СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [2];<br>ГОСТ 12.1.029-80 [3];<br>СП 52.13330.2.011 [4]; Сан-ПиН 2.2.4.548-96 [5]; Сан-Сан-ПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [6];<br>ГОСТ 31581-2012 [7];<br>ГОСТ 12.1.040-83 [8] |

#### 4.1.1.1 Повышенный уровень шума на рабочем месте

Одним из вредных факторов является повышенный уровень шума. При работе лазерной установки, монитора, процессора возникает шум, который воздействует на органы слуха. Он может быть стабильным и импульсным в зависимости от вида лазера и характера работы.

ПДУ шума различных источников представлены в табл.4.2 [15]

Таблица 4.2 – Допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах

| Вид трудовой деятельности  | Уровни звукового давления в дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц |    |     |     |     |      |      |      |      | Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА |
|--|--|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|--|
|  | 31,5   | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |  |
| Работа, требующая сосредоточенности; работа с повышенными требованиями к процессам наблюдения и дистанционного управления производственными циклами, за пультами и др. | 103  | 91 | 83  | 77  | 73  | 70   | 68   | 66   | 64   | 75   |
| Выполнение всех видов работ на постоянных рабочих местах в производственных помещениях   | 107  | 95 | 87  | 82  | 78  | 75   | 73   | 71   | 69   | 80   |

Шум относится к тем неблагоприятным факторам производственной среды, к которым нельзя привыкнуть. В биологическом отношении, шум – это сильный стрессовый фактор, вызывающий значительные изменения в центральной и периферической нервной системе, сердечно-сосудистой системе, нейроэндокринной регуляции, функционировании органов желудочно-кишечного тракта.

Стандарт ГОСТ 12.1.029-80 устанавливает общую классификацию средств и методов защиты от шума [16]. Борьба с неблагоприятным воздействием шума включает целый комплекс мероприятий, относящихся к технической и медицинской компетенции, главными из которых являются:

- применение средств индивидуальной защиты от шума (противошумные наушники, закрывающие ушную раковину снаружи; противошумные вкладыши, перекрывающие наружный слуховой проход или прилегающие к нему);
- применение средств коллективной защиты от акустического шума, источником которого является контроллер и фазосдвигающие ячейки. Средством звукоизоляции являются звукоизолирующие кожухи;
- рационализация режимов труда и отдыха. Регулировка интенсивности труда и профилактика производственного утомления обеспечиваются проведением организационно-технических мероприятий, в том числе внедрением рациональных режимов труда и отдыха.

#### 4.1.1.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Подавляющее большинство работ, производимых в лаборатории, осуществляется под контролем зрения, в том числе наблюдение за ходом процесса. Поэтому при выполнении почти любой работы орган зрения человека имеет ту или иную степень напряжения. Поэтому происходит утомление органа зрения, и в свою очередь, утомление органа зрения приводит к общему утомлению организма. Напряжение органа зрения и работоспособность зависят от характера выполняемой работы и от степени и качества освещения на рабочем месте.

Нормы освещенности в лабораторных помещениях приведены устанавливаются СП 52.13330.2011 (табл.4.3) [17].

Таблица 4.3 – Нормативные показатели освещения основных помещений общественных, жилых, вспомогательных зданий [17]

| Помеще-<br>ния      | Плоскость<br>(Г - гори-<br>зонталь-<br>ная, В -<br>верти-<br>кальная)<br>нормиро-<br>вания<br>освещен-<br>ности и<br>КЕО, вы-<br>сота плос-<br>кости над<br>полом, м | Разряд<br>и<br>подраз-<br>ряд<br>зритель-<br>тельной ра-<br>боты | Искусственное освещение                            |  |  |  |   | Естественное<br>освещение   |                                       | Совмещенное<br>освещение  |                                       |
|---------------------|--|--|--|--|--|--|---|---|---------------------------------------|---|---------------------------------------|
|                     |  |  | Освещенность<br>рабочих по-<br>верхностей, лк      |  | Цилин-<br>дриче-<br>ская<br>освещен-<br>ность,<br>лк | Объеди-<br>ненный<br>показа-<br>тель<br>диском-<br>форта<br>UGR, не<br>более | Кoeffи-<br>циент<br>пульсации<br>освещен-<br>ности, не<br>более | КЕО, е <sub>н</sub> , %   |                                       | КЕО, е <sub>н</sub> , %   |                                       |
|                     |  |  | при<br>комби-<br>ниро-<br>ванном<br>осве-<br>щении | при<br>об-<br>щем<br>осве-<br>ще-<br>нии |  |  |   | при<br>верх-<br>нем<br>или<br>комби-<br>ниро-<br>ванном<br>осве-<br>щении | при<br>боко-<br>вом<br>осве-<br>щении | при<br>верх-<br>нем<br>или<br>комби-<br>ниро-<br>ванном<br>осве-<br>щении | при<br>боко-<br>вом<br>осве-<br>щении |
|                     |  |  |  |  |  |  |   |   |                                       |   |                                       |
| 13 Лабо-<br>ратории | Г-0,8  | А-2  | 500/300  | 400                                      | -  | 21   | 10/15   | 3,5   | 1,2                                   | 2,1   | 0,7                                   |

Искусственное освещение по своему назначению делится на две системы: общее, предназначенное для освещения всего рабочего помещения, и комбинированное, когда к общему освещению добавляется местное освещение, концентрирующее световой поток непосредственно на рабочем месте.

Искусственное освещение в лаборатории создается электрическими источниками света, в данном случае люминесцентными лампами. Для рационального использования светового потока источники искусственного освещения заключаются в специальную арматуру. Источник света с осветительной арматурой называется светильником.

Все светильники искусственного освещения по мере их загрязнения пылью, значительно снижают световой поток и освещенность. Поэтому необходимо систематически протирать лампы и арматуру, а также своевременно заменять перегоревшие лампы (обязательно такими же по мощности и по качеству). Для этого в лаборатории имеются приспособления для свободного и безопасного доступа к светильникам, особенно для общего освещения, размещенным в верхней зоне (выдвижная лестница, устойчивая стремянка).

#### 4.1.1.3 Отклонение показателей микроклимата в помещении

Микроклимат производственных помещений, складываются из температуры воздуха, температуры поверхностей, относительной влажности воздуха, скорости движения воздуха, интенсивность теплового облучения. Эти показатели микроклимата должны обеспечивать сохранение теплового баланса человека с окружающей средой и поддержание оптимального или допустимого теплового состояния организма [18].

Допустимые микроклиматические условия - обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение восьмичасовой рабочей смены, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, создают предпосылки для высокого уровня работоспособности и являются предпочтительными на рабочих местах.



Категории работ разграничиваются на основе интенсивности энергозатрат организма в ккал/ч (Вт): Ia, Ib, IIa, IIb, III. В данной лаборатории категория работ IIa. К ней относятся работы с интенсивностью энергозатрат 151-200 ккал/ч (175-232 Вт), связанные с постоянной ходьбой, перемещением мелких (до 1 кг) изделий или предметов в положении стоя или сидя и требующие определенного физического напряжения (юстировка системы, изменение параметров пучка, введение в систему дополнительного оборудования и т.д.).

Таблица 4.4 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений [18]

| Период года | Категория работ по уровню энергозатрат, Вт | Температура воздуха, °С           |                                   | Температура поверхностей, °С | Относительная влажность воздуха, % | Скорость движения воздуха, м/с                                      |   |
|-------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|---|---|
|             |  | диапазон ниже оптимальных величин | диапазон выше оптимальных величин |                              |                                    | для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более | для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более |
| Холодный    | IIa (175-232)                              | 17,0-18,9                         | 21,1-23,0                         | 16,0-24,0                    | 15-75                              | 0,1   | 0,3   |
| Теплый      | 18,0-19,9                                  | 22,1-27,0                         | 17,0-28,0                         | 15-75                        | 0,1                                | 0,4   | 18,0-19,9   |

Допустимые микроклиматические условия - не вызывают повреждений или нарушений состояния здоровья, но могут приводить к возникновению общих и локальных ощущений теплового дискомфорта, ухудшению самочувствия и понижению работоспособности.

В целях защиты работающих от возможного перегрева или охлаждения, при температуре воздуха на рабочих местах выше или ниже допустимых величин, время пребывания на рабочих местах (непрерывно или суммарно за рабочую смену) должно быть ограничено величинами, указанными в табл. 4.5 и табл. 4.6. При этом среднесменная температура воздуха, при которой работаю-

щие находятся в течение рабочей смены на рабочих местах и местах отдыха, не должна выходить за пределы допустимых величин температуры воздуха для соответствующих категорий работ, указанных в табл.1.1.3.1 [18].

Таблица 4.5 – Время пребывания на рабочих местах при температуре воздуха выше допустимых величин[18]

| Температура воздуха на рабочем месте, °С | Время прибывания, не более при категориях работ IIa |
|--|---|
| 32,5                                     | -   |
| 32,0                                     | -   |
| 31,5                                     | 1   |
| 31,0                                     | 2   |
| 30,5                                     | 2,5   |
| 30,0                                     | 3   |
| 29,5                                     | 4   |
| 29,0                                     | 5   |
| 28,5                                     | 5,5   |
| 28,0                                     | 6   |
| 27,5                                     | 7   |
| 27,0                                     | 8   |
| 26,5                                     | -   |
| 26,0                                     | -   |

Таблица 4.6 – Время пребывания на рабочих местах при температуре воздуха ниже допустимых величин[18]

| Температура воздуха на рабочем месте, °С | Время прибывания, не более при категориях работ IIa |
|--|---|
| 6  | -   |
| 7  | -   |
| 8  | -   |
| 9  | -   |
| 10                                       | 1   |
| 11                                       | 2   |
| 12                                       | 3   |
| 13                                       | 4   |
| 14                                       | 5   |
| 15                                       | 6   |
| 16                                       | 7   |
| 17                                       | 8   |
| 18                                       | -   |
| 19                                       | -   |
| 20                                       | -   |

Остальные показатели микроклимата (относительная влажность воздуха, скорость движения воздуха, температура поверхностей, интенсивность тепло-

вого облучения) на рабочих местах должны быть в пределах допустимых величин настоящих.

В целях профилактики неблагоприятного воздействия микроклимата используются защитные мероприятия. Осуществляется организация принудительного воздухообмена. На летний период оконные проемы открываются для проветривания, при этом они зашторены белой редкой тканью. Так же, для охлаждения воздуха, поступающего в лабораторию, производится мелкое распыление воды при помощи специальных форсунок в открытых оконных проемах.

Мероприятия по борьбе с холодом и предупреждению переохлаждения сводятся в основном к мерам индивидуальной защиты и личной гигиены. Для обогрева рабочего места целесообразно применение систем отопления. Для этой цели используются специальные электрические приборы (инфракрасные нагреватели) и системы водяного отопления (чугунные радиаторы.)

#### 4.1.1.4 Нервно-психические перегрузки

При проведении исследований возникает психофизиологическое воздействие на организм, которое влечет за собой нервно-психические перегрузки:

- умственное перенапряжение и перенапряжение анализаторов, вызванные информационной нагрузкой;
- монотонность труда, вызывающая монотонию;
- эмоциональные перегрузки;
- длительность сосредоточенного наблюдения;
- работа с оптическими приборами [14].

При работе с компьютером основное напряжение приходится на зрительные органы. Но даже если соблюдать все правила расположения размещения органов управления перед монитором, все равно остаются такие факторы как запыленность экрана или блики на нем [19]. Эти проблемы нельзя решить, избавившись от одного вредного фактора, необходимо удалять их вместе, ком-

плексом. И даже проводя все возможные мероприятия, зрение все равно будет становиться хуже, так как при работе за ПК оператор непроизвольно моргает меньше, чем обычно, это приводит к ускоренному ухудшению зрения.

Большое влияние на работника оказывает монотонность труда. Монотонность труда это выполнение одних и тех же операций в течение длительного промежутка времени, что приводит к переутомлению и повреждению нервной системы и, конечно же, к снижению темпов и качеству работы.

Для снижения вероятности возникновения нервно-психических перегрузок на организм человека рекомендуется делать перерывы в течение рабочего дня. Во время перерывов рекомендуется выполнять упражнения для снятия физического напряжения с туловища и ног и для улучшения кровообращения.

#### 4.1.1.5 Повышенный уровень электромагнитных излучений

В лаборатории так же вредным фактором является лазерное излучение (вид электромагнитного излучения). Для эксперимента используется лазер класса 1. Лазер работает на длине волны 1064 нм, такое излучение является невидимым. Лазерные изделия такого класса являются безопасными при предполагаемых условиях эксплуатации в ГОСТ 31581-2012. В табл. 4.7 Приведены допустимые пределы излучения (ДПИ) для используемого лазера.

Лазерное изделие имеет знак предупреждения о лазерной опасности с указанием класса изделия (рис. 4.1). Также присутствует табличка на защитном устройстве с надписью: "Внимание! При открывании - лазерное излучение".

Лазерная безопасность установлена по ГОСТ 12.1.040-83 [21]. Согласно которому, рабочее место в лаборатории организовано таким образом, что исключена возможность воздействия на персонал лазерным излучением. В том числе Персонал обеспечен средствами индивидуальной защиты, в частности, специальными защитными очками [21].

Таблица 4.7 - Допустимые пределы излучения для лазерных изделий класса 1 [20]

| Длина волны, нм | Длительность излучения, t, с |                      |                   |                             |                                   |      |           |                      |                                    |
|-----------------|------------------------------|----------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------------|------|-----------|----------------------|------------------------------------|
|                 | $<10^{-9}$                   | $10^{-9}-10^{-9}$    | $10^{-9}-10^{-7}$ | $10^{-7}-1.8 \cdot 10^{-5}$ | $5 \cdot 10^{-5}-1 \cdot 10^{-3}$ | 3-10 | $10-10^3$ | $0^9-10^9$           | $10^3-10^4$<br>$10^4-3 \cdot 10^4$ |
| 1050-1400       | $2 \cdot 10^3$ Вт            | $2 \cdot 10^{-6}$ Дж |                   |                             | $3,5 \cdot 10^{-3}$ Дж            |      |           | $6 \cdot 10^{-4}$ Вт |                                    |

Знак и окантовка: черные  
Фон: желтый



Рисунок 4.1 – Знак лазерной опасности [7]

При проведении наладочных и юстированных работ в качестве мишени используется визуализатор (камера Spiricon). Для индикации излучения вдоль оптического тракта применяется луч пилотного лазера (красная лазерная указка) и матовая бумага.

#### 4.1.1.6 Электрический ток

Одной из опасностей для персонала лаборатории является опасность поражения электрическим током. Поражение электрическим током возникает при

непосредственном соприкосновении человека с электрической цепью, в которой присутствует источник напряжения или тока, способный вызвать протекание тока по попавшей под напряжение части тела.

Помещения по степени опасности поражения людей электрическим током подразделяются согласно ПУЭ на: помещения без повышенной опасности; помещения с повышенной опасностью; особо опасные помещения; территории размещения наружных электроустановок.

Помещение, в котором находится лаборатория относится к помещению без повышенной опасности. Так как отсутствуют нижеперечисленные условия:

- сырости (влажность более 75 %) или токопроводящей пыли;
- токопроводящих полов (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п.);
- высокой температуры (выше 35 °С);
- возможности прикосновения человека к металлическим корпусам электрооборудования, у которых может быть нарушена изоляция.

В помещении выполнение защиты при косвенном прикосновении может потребоваться при напряжениях 25 В переменного и 60 В постоянного тока [21].

Сила поражения электрическим током различна и поэтому последствия поражения электрическим током тоже различны. Сила поражения электрическим током зависит от нескольких факторов: от класса напряжения; от времени воздействия; от характера тока; от индивидуальных особенностей организма; от пути прохождения тока по организму; от места соприкосновения человека с оборудованием. Проходя через организм, электрический ток производит термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействия. Говоря о последствиях нужно отметить, что из-за нагрева человеческих тканей, поражение электрическим током вызывает ожоги, иногда эти ожоги не совместимы с жизнью. Так же во время удара происходит разложение органических жидкостей, таких как кровь, внутри организма. Удары током могут вызвать сбои в работе сердечной мышцы и нервной системы. При поражении головы

электрическим током возможна потеря сознания. Удары электрическим током приводят к нарушениям биологических процессов.

Требования электробезопасности описывается в ГОСТ 12.1.019-79 [22]. Существуют различные методы и мероприятия, позволяющие снизить вероятность поражения электрическим током до нуля при использовании электрооборудования. Технические средства защиты от поражения электрическим током можно разделить по различным критериям: коллективные, индивидуальные, средства, предупреждающие прикосновение людей к элементам сети, находящимся под напряжением, и на средства, которые обеспечивают безопасность, если прикосновение уже произошло.

К основным способам и средствам электрозащиты относятся: зануление и заземление, изоляция токопроводящих частей, использование различных предупреждающих плакатов и знаков, использование индивидуальных средств защиты (диэлектрические коврики), защитное отключение [22].

#### 4.2. Экологическая безопасность

В данном разделе отражено воздействие результатов исследования на окружающую среду при внедрении на производстве. Полученный лазерный пучок будет использоваться для задач обработки материалов (алюминий, сталь, медь).

При работе на лазерных установках необходимо использование системы, которая находится под давлением, и в качестве газа будет использоваться воздух, поэтому вредное влияния на атмосферу отсутствует. Взаимодействие ЛИ с обрабатываемым материалом выделяет незначительное количество вредных аэрозолей.

На данном лазерном оборудовании будет осуществляться обработка таких материалов, которые на этапе переработки сырья оказывают пагубное влияние на экологию. Согласно ПОТ Р М-005-97 сбор, сортировка и кратковременное хранение отходов, образовавшихся при термической обработке метал-

лов, должны производиться в специально отведенных для этого местах [24]. При лазерной обработке материалов возникает необходимость утилизации твердых отходов производства. Для этого необходимо осуществлять планирование сбора отходов на предприятии. Твердые отходы требуют специальной утилизации, что тоже плохо влияет на гидросферу и литосферу.

Опасными отходами являются отработанные ртутьсодержащие люминесцентные лампы, которые используются при освещении рабочего места. Ртуть относится к вредным веществам 1 категории [25], и его неправильная утилизация сильно отравляет окружающую среду и находящихся рядом людей.

После утилизации отходы необходимо отправлять на переработку, металл отправлять на переплавку на предприятия черной и цветной металлургии. А те отходы, которые не подлежат переработке, отправляют на специальные полигоны для захоронения.

#### 4.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

В каждом производственном помещении проводят мероприятия по действиям при возникновении пожара или угрозы террора. Наиболее вероятным является возникновение пожара. Причиной пожара могут служить самые разные причины, такие как: неисправная проводка; неисправное электрооборудование; несоблюдение техники пожарной безопасности; искровые разряды статического электричества; не своевременный ремонт оборудования и многое другое.

В соответствии с СП 12.13130.2009 [26] была определена категория помещения по взрывопожарной и пожарной опасности. Данное помещение имеет категорию опасности В1-В4. Эти категории характеризуются горючими и трудногорючими жидкостями, твердыми горючими и трудногорючими веществами и материалами (в том числе пыли и волокна), веществами и материалами, способными при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых они находят-



ся (обращаются), не относятся к категории А или Б [27]. В помещении лаборатории присутствуют твердые горючие вещества, такие как деревянные элементы мебели (шкаф, рабочий стол), деревянные окна и межкомнатные двери, канцелярские принадлежности.

Основными мерами для предотвращения пожаров являются соблюдения всех стандартов по проектированию и строительству зданий и сооружений, своевременный ремонт и проверка электрооборудования, а также соблюдение правил пожарной безопасности по СНиП 21-01-97\* [27].

Мероприятия, которые проводятся в лаборатории для предотвращения возникновения:

- В помещении на видном месте вывешены таблички с указанием номера телефона вызова пожарной команды и инструкции о мерах пожарной безопасности;

- В помещении установлен соответствующий его пожарной опасности противопожарный режим, в том числе:

- определены и оборудованы места для курения;
- установлен порядок уборки горючих отходов и пыли;
- определён порядок обесточивания электрооборудования в случае пожара и по окончании рабочего дня;
- порядок осмотра и закрытия помещений после окончания работы;
- действия работников при обнаружении пожара;
- определён порядок и сроки прохождения противопожарного инструктажа и занятий по пожарно-техническому минимуму, а также назначены ответственные за их проведение [28].

- В помещении лаборатории на видном месте вывешен план эвакуации в случае пожара (рис.4.2).

В дополнение к схематическому плану эвакуации людей при пожаре разработана инструкция, определяющая действия персонала по обеспечению безопасной и быстрой эвакуации людей, по которой не реже одного раза в по-

лугодие проводятся практические тренировки всех задействованных в эвакуации работников.

- Работники, находящиеся на территории лаборатории, обязаны:

- соблюдать требования пожарной безопасности стандартов, норм и правил, утверждённых в установленном порядке, а также соблюдать и поддерживать противопожарный режим;
- выполнять меры предосторожности при пользовании электроприборами, другими опасными в пожарном отношении веществами, материалами и оборудованием.

В соответствии с нормами СНиП 21-01-97\* для ликвидации пожаров в начальной стадии применяются первичные средства пожаротушения. В лаборатории имеется ручной углекислотный огнетушитель ОУ-5.



Рисунок 4.2 – План эвакуации при пожаре и других ЧС

#### 4.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

##### 4.4.1 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны, связанные с требованиями к размещению лазерных изделий и организации рабочих

мест устанавливаются в соответствии с ГОСТ 31581-2012 [20] и ГОСТ 12.3.002 [29].

Размещение лазерных изделий в каждом конкретном случае проводится с учетом класса опасности изделия, условий и режима труда персонала, особенностей технологического процесса, подводки коммуникаций, планировки помещений и т.д. Для лазеров 1 класса опасности требования к размещению лазера не регламентируются, т.к. такие лазеры являются безопасными при эксплуатации.

Однако существуют определенные требования к организации рабочих мест. Рабочие места должны быть организованы таким образом, чтобы исключать возможность воздействия на персонал лазерного излучения или чтобы его величина не превышала ДПИ для класса 1 (табл. 4.7) [20]. В лаборатории рабочее место и взаимное расположение всех элементов (органов управления, средств отображения информации, оповещения и др.) обеспечивают рациональность рабочих движений и максимально учитывают энергетические, скоростные, силовые и психофизиологические возможности работника. Так же предусмотрены места для размещения съемных деталей (линзы, светоделительные кубики и др.) и переносной измерительной аппаратуры (датчик волнового фронта, измеритель мощности, осциллограф). Для этих целей установлен дополнительный стол и шкаф.

При работе с лазерами 1 класса в соответствии с ГОСТ 31581-2012 устанавливаемые требования к помещениям:

- помещение соответствует требованиям пожарной безопасности и имеет необходимые средства предотвращения пожара и противопожарной защиты (см п.4.4);
- все поверхности в помещении окрашены без применения глянцевых, блестящих, хорошо (зеркально) отражающих лазерное излучение материалов;
- дверь в помещение имеет знак лазерной безопасности (рис. 4.1).

## Заключение

В первом разделе данной ВКР были изучены наиболее распространенные формы распределения интенсивности пучков, такие как Гауссовы, «Top-hat», Бесселевы и кольцевые пучки, а также оптические вихревые пучки. Такие пучки могут быть получены несколькими методами: спектральное, некогерентное и когерентное суммирование пучков.

Но наиболее интересными, в рамках данной работы, являются оптические вихревые пучки, обладающие нулевой интенсивностью в центре пучка. Исходя из цели данной работы, наибольший интерес представляют собой методы фазирования пучков, которые применяются в задачах когерентного суммирования лазерных пучков. В свою очередь когерентное суммирование основано на явлениях когерентности и интерференции. Важно отметить, что такой метод был экспериментально продемонстрирован впервые.

Существует несколько методов когерентного суммирования пучков. Нами использовалось активное когерентное суммирование пучков из семи лазерных усилителей, при этом фазировка пучков осуществлялась методом стохастического параллельного градиентного спуска (SPGD).

Во втором разделе описаны экспериментальная установка и ее настройка, а также приведены результаты экспериментальных исследований. Так установка представляет собой систему, в которой излучение волоконного лазера разделяется на семь каналов, содержащих управляемые фазосдвигающие ячейки, и выводится в свободное пространство посредством семи-апертурного коллиматора (формирует параллельные пучки, ориентированные гексагонально).

Для формирования вихревых пучков достаточно использовать шесть субпучков, расположенных по кругу (центральный субпучок в формировании вихревого пучка не задействуется). В начальный момент все пучки фазированы и когерентно складываются в дальней зоне, затем фазовое состояние одного пучка фиксируется, а фазы остальных пучков сдвигаются  $2\pi/3$  ( $l=2$ )

или  $2\pi/6$  ( $l=1$ ) относительно друг друга, а при обходе по кругу из шести субпучков общий набег фазы равняется  $2\pi$ .

В итоге была экспериментально продемонстрирована возможность формирования скалярных вихревых пучков обладающих ОУМ, путём фазирования матрицы волоконных лазеров. При этом управление фазовыми характеристиками синтезированного пучка осуществлялась путем когерентного сложения (фазировки) излучения и обеспечения заданного фазового сдвига на соседних субапертурах, расположенных по кругу. Все это позволяет генерировать вихревые пучки с изменяемым значением ОУМ.

При когерентном сложении излучения матрицы оптоволоконных излучателей независимо от числа субапертур значение интенсивности излучения на оси синтезированного пучка в плоскости фокусировки излучения возрастает пропорционально квадрату числа субапертур. При некогерентном сложении излучения форма суммарного пучка совпадает с формой пучка, сформированного единственной субапертурой. При этом значение интенсивности излучения на оси в плоскости фокусировки изменяется пропорционально числу складываемых субапертур.

В третьем разделе были рассмотрены вопросы экономической эффективности и ресурсоэффективности. Бюджет данного научно-исследовательской работы составил 2 026 000 руб. Такая сумма связана с высокой стоимостью оборудования, которые используются в экспериментальной установке. В этом методе есть много возможностей для оптимизации производительности, но этот метод имеет ограничения в масштабировании каналов. Этот метод является перспективным, так как есть возможность обойти ограничения на масштабируемость каналов при увеличении стоимости и сложности системы.

Ресурсоэффективность определялась на основе сравнения с методом спектрального суммирования пучков. В итоге этого сравнения когерентное суммирование оказалось наиболее эффективным.

Также в данной ВКР рассмотрены вопросы по обеспечению безопасности персонала, работающего на оборудовании. На персонал могут воздейство-

вать следующие опасные и вредные производственные факторы: повышенный уровень шума на рабочем месте; недостаточная освещенность рабочей зоны; отклонение показателей микроклимата в помещении; нервно-психические перегрузки; электрический ток. Все эти опасные и вредные факторы могут негативно влиять на человека, и, для исключения или уменьшения этого влияния, необходимо использовать средства коллективной и индивидуальной защиты. При соблюдении всех необходимых мер безопасности, в том числе соблюдение требований к организации рабочих мест оборудование может эксплуатироваться с наименьшей степенью риска для здоровья человека.

По итогам выполненной работы планируется участи в XIII Международной конференции по импульсным лазерам и применениям лазеров AMPL-2017 10-15 сентября 2017 года в г. Томске, с темой доклада «Экспериментальное исследование возможности формирования лазерного пучка, обладающего орбитальным угловым моментом в системе когерентного сложения пучков волоконных лазеров».

## Список публикаций

О.С. Кролевец, М.Е. Левицкий. Экспериментальная установка для формирования распределения интенсивности с помощью управления фазами в многоканальной системе волоконных лазеров [Электронный ресурс] // Фотоника и информационная оптика: сборник научных трудов VI Международной конференции по фотонике и информационной оптике, Москва, 1-3 Февраля 2017. - М: НИЯУ МИФИ, 2017. – С. 482-483

## Список используемых источников

1. Steen W. M., Laser Materials Processing // - 2nd ed. - Springer, London, 1991. – Vol. 253.
2. Dudley W., Laser Processing and Analysis of Materials / Plenum Press. - New York, USA, 1983.
3. Kannatey-Asibu E., Principles of Laser Materials Processing / John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. - New Jersey, 2009.
4. Duocastella M. Bessel and annular beams for materials processing / M.Duocastella and C.B. Arnold // Laser Photonics Rev. – 2012. - Vol.6. - N 5. - P. 607-621.
5. Rioux, R. Linear, annular, and radial focusing with axicons and applications to laser machining / M. Rioux, R. Tremblay, P. A. Belanger // Appl. Optics. – 1978. – Vol. 17, P. 1532-1536.
6. Wang, L.-G. Formation of optical vortices using laser beam arrays/ L.-G. Wang, L.-Q. Wang, S.-Y. Zhu // Opt. Commun. – 2009. - Vol. 282. – P. 1088-1094.
7. В.П.Аксенова. Особенности вихревых пучков, сформированных матрицей волоконных лазеров, и их распространение в турбулентной атмосфере / Н.В.Дудорова, В.В.Колосова. - Квантовая электроника №46, 2016.
8. Оптика, атомная и квантовая физика: Учебно-методический комплекс по курсу «Физика» для студ. всех спец. БГУИР заоч. формы обуч. /В.В. Аксенов, А.В. Березин, В.А. Морозов, Ю.И. Савилова. – Мн.: БГУИР, 2005. – 84 с.: ил.
9. Ландсберг Г.С. Оптика. Учеб. Пособие: Для вузов. – 6-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с. – ISBN 5-9221-0314-8.
10. Fan T. Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources / IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 11, no. 3, pp. 567–577, May/Jun. 2005.
11. Brignon A. (ed.) Coherent Laser Beam Combining / Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. - Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany 2013.



12. Датчики волнового фронта [Электронный ресурс].- Режим доступа: [http://www.laser-portal.ru/content\\_706](http://www.laser-portal.ru/content_706), свободный. – Загл. с экрана.
13. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.
14. ГОСТ 12.0.003-74 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (с Изменением N 1)
15. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы
16. ГОСТ 12.1.029-80 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация
17. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*
18. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
19. СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
20. ГОСТ 31581-2012 Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий
21. Правила устройства электроустановок (ПУЭ), изд. 7, 2001-2004 г.
22. ГОСТ 12.1.019-79 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты (с Изменением N 1)
23. ГОСТ 12.1.040-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Лазерная безопасность. Общие положения (с Изменением N 1)

24. ПОТ Р М-005-97 Межотраслевые правила по охране труда при термической обработке металлов

25. ГОСТ Р 52105-2003 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Классификация и методы переработки ртутьсодержащих отходов. Основные положения

26. СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением N 1). – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009 год

27. СНиП 21-01-97\* Пожарная безопасность зданий и сооружений (с Изменениями N 1, 2)

28. 69-ФЗ О пожарной безопасности (с изменениями на 23 июня 2016 года)

29. ГОСТ 12.3.002-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Процессы производственные. Общие требования безопасности

## Приложение 1

### Раздел 1 Literature revive

Студент:

| Группа | ФИО                      | Подпись | Дата |
|--------|--------------------------|---------|------|
| 4BM5Б  | Кролевец Ольга Сергеевна |         |      |

Консультант кафедры \_\_\_\_\_ (аббревиатура кафедры) \_\_\_\_\_ :

| Должность | ФИО | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------|-----|---------------------------|---------|------|
|           |     |                           |         |      |

Консультант – лингвист кафедры \_\_\_\_\_ (аббревиатура кафедры) \_\_\_\_\_ :

| Должность                             | ФИО                            | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент кафедры иностранных языков ФТИ | Устюжанина Анна Константиновна | к. ф. н.,<br>доцент       |         |      |

## Literature revive

|  |       |
|--|-------|
| 1. Forms of intensity distribution .....                         | 1011  |
| 1.1 Gaussian and Top-hat beams .....                             | 1022  |
| 1.2 Top-hat beams .....  | 1033  |
| 1.3 Bessel and annular beams .....                               | 1044  |
| 1.4 Optical vortex beam .....                                    | 10707 |
| 2. Beam-combining techniques on laser arrays .....               | 10909 |
| 3. The realization of a system with coherent beam combining..... | 11212 |

## 1. Forms of intensity distribution

Lasers have become indispensable for materials processing in scientific and industrial applications. They offer a highly directional and localized source of energy, which facilitates materials modifications at precise locations. Modern laser systems are also flexible, in the sense that it is relatively easy to adapt parameters such as the beam size or the beam energy to specific requirements, and systems can be scaled up to provide high throughput processing over multiple length scales.

The typical laser parameters that are controlled for materials processing include energy, fluence (energy per unit area), spot size, wavelength, polarization and, in the case of pulsed lasers, pulse duration and repetition rate. The role of these parameters on the resulting structures and properties has been widely studied, both experimentally and theoretically and such understanding is essential in order to determine the optimum processing conditions. For example, laser fluence can affect the grain size of polycrystalline silicon (poly-Si) obtained through laser annealing of amorphous silicon. This factor can drastically influence the performance of poly-Si devices such as thin film transistors. The response of biological tissues is dependent upon the laser wavelength, affecting the performance of surgical techniques such as Laser In Situ Keratomileusis (LASIK). Beam polarization can influence absorption in a given material, affecting the resultant structures achieved through techniques such as laser cutting or welding. The rate at which energy is delivered in a material also affects the modification process. In particular, the laser pulse duration can have a significant effect on the material removal dynamics. This leads to a more rapid ejection of material with a smaller heat affected zone as the temporal pulse length is shortened.

The control and influence of other laser parameters is less common yet these can also be important factors in materials processing. One of these is the laser beam shape, defined as the irradiance distribution of the light when it arrives at the material of interest.

## 1.1 Gaussian and Top-hat beams

Gaussian beams are by far the most common beam shape used in materials processing. Notably, the Fourier transform remains a Gaussian and thus preserves its shape as it passes through an optical system consisting of simple lenses. The propagation of the intensity of a Gaussian beam is shown in Fig. 1.1. This is especially important in laser processing, where multiple optical elements are typically employed to guide the laser radiation to the workpiece.

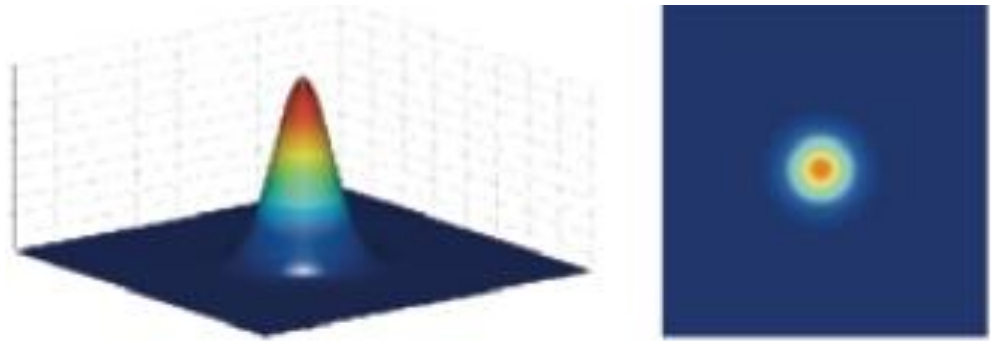


Figure 1.1 – The propagation of the intensity of a Gaussian beam

The spatial structure of the radiation intensity of lasers is described by the Gaussian distribution function with a sufficient degree of accuracy:

$$I(r, \theta) = I_0 \exp\left(-2 \frac{(r - r_c)^2}{\omega^2}\right) \quad (1.1)$$

where  $I_0$  – the maximum intensity of the beam;

$r_c$  – coordinate of the point with the maximum intensity of the beam;

$\omega$  – lateral size of the beam in the waist region.

An important property of Gaussian beams for materials processing is their low divergence, which allows for a small focused spot:

$$d_f^G = 1.26 \frac{\lambda}{d} F \quad (1.2)$$

where  $F$  – the focal distance lens;

$d$  – the beam diameter in the plane of the lens;

$\lambda$  – the wavelength emission.

Most lasers operate in the fundamental transverse electromagnetic mode of the cavity ( $TEM_{00}$ ), and additional elements are not needed to modify the beam shape. Since the output of a finite cavity will have some non-ideal character, a quality factor  $M^2$  ( $M^2 \geq 1$ ) is defined which indicates how close a real beam is to a perfect Gaussian beam ( $M^2 = 1$ ).

An important property of the Gaussian beams for materials is their low divergence, which is for a small focused spot. In fact, when focusing a Gaussian beam in air using a lens with a given numerical aperture  $NA$  beam diameter at the focus ( $d_f$ ) can be expressed:

$$d_f \approx 2 \frac{\lambda}{\pi} \frac{M^2}{NA} \quad (1.3)$$

Another important factor in the laser processing of materials is related to beam divergence, is the depth of field  $z_f$ . In the context of materials processing, we can think of it as the distance a workpiece can be moved away from the beam waist while still maintaining the focal beam size. More specifically, it can be defined as the Rayleigh range,  $z_r$ :

$$z_f = z_r \approx \frac{\pi}{4\lambda} \frac{d_f^2}{M^2} \quad (1.4)$$

The Rayleigh range represents the distance from the beam waist along the propagation direction at which the beam doubles its cross sectional area.

## 1.2 Top-hat beams

Top-hat beams are also widely used for materials processing applications (Fig.1.2). For instance, excimer lasers generally produce a Top-hat output with varying degrees of uniformity across the beam. Alternatively, optical elements are used such as beam shapers when the output beam from the laser cavity is a Gaussian or homogenizer systems when the output is multimode. In comparison to Gaussians,

Top-hat beams have an  $M^2$  value much higher than 10. Thus, from Eqs. 1.3 and 1.4 it can be deduced that the minimum spot size will not be as small as with Gaussian beams, and that the depth of field will not be as long. However, the improved spatial uniformity of Top-hat beams presents important benefits for specific materials processing applications in comparison to Gaussian beams. This accounts for the preference of this type of beam for heat treatments such as laser annealing, materials deposition such as in pulsed laser deposition, welding applications with improved weld quality and repeatability, and even photolithography.

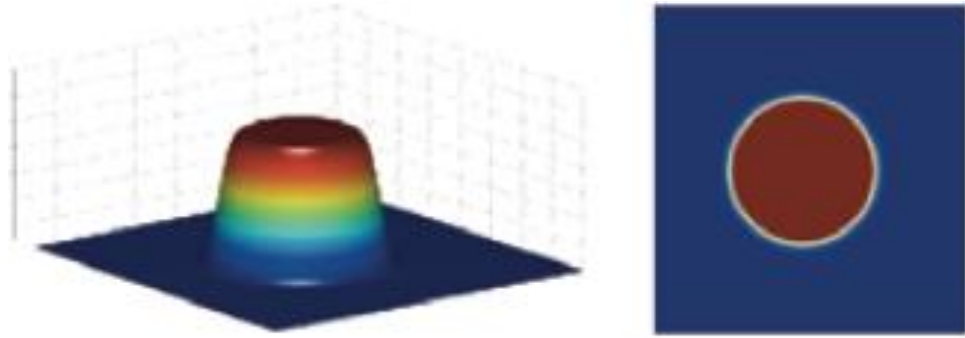


Figure 1.2 – The propagation of the intensity of a Top-hat beam

One of the major challenges associated with Top-hat beams is that unlike Gaussians, they do not maintain their shape as they propagate, and thus they only present a uniform intensity distribution near the focal point or imaging location of the optical system. Outside this zone, the beam profile and quality vary, which can lead to non-uniform processing and undesired effects.

### 1.3 Bessel and annular beams

For the purposes of this paper, we define a Bessel beam which is a beam with the electric field explicitly described by a zero-order Bessel function of the first kind  $J_0$ :

$$E(r, \varphi, z) = A_0 \exp(ik_z z) J_0(k_r r) \quad (1.5)$$

where  $r$  and  $\varphi$  - are transverse and polar coordinates;

$z$  - is the coordinate in the propagation direction;



$k_z$  and  $k_r$  - are the longitudinal and radial wave vectors.

More generally, the term Bessel beam could refer to higher order functions although we ignore those here. Since the beam intensity is proportional to the square of the electric field for a Bessel beam,

$$I(r, \varphi, z) \propto J_0^2(k_r r) \quad (1.6)$$

This beam does not appear as a single spot, but rather as a series of concentric rings (Fig.1.3).

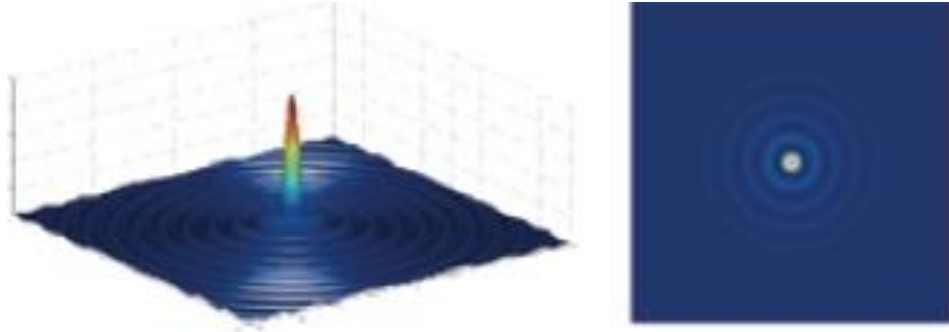


Figure 1.3 – The propagation of the intensity of a Bessel beam

According to Eq. 1.6, the number of rings of a Bessel beam should be infinite. However, in laboratory generated Bessel beams the presence of finite apertures produces Bessel beams with finite dimensions. It is important to note that in the far field, as the separation between the wave vectors increases, the beam intensity in the central axis decreases and eventually attains a zero value, which corresponds to an annular beam.

An annular beam is a beam with an intensity distribution concentrated in a ring with no on-axis intensity, as represented in Fig. 1.4. There exist multiple sorts of annular beams depending on the irradiance distribution within the annulus.

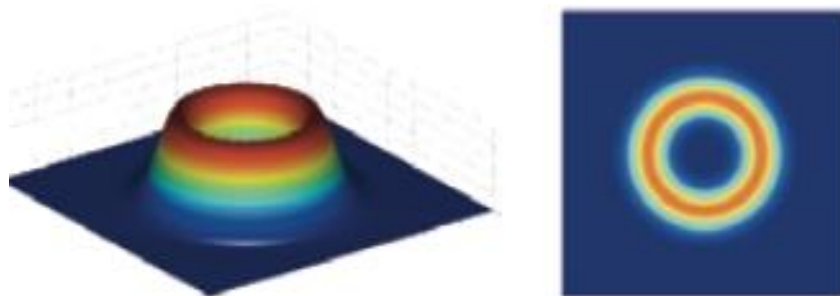


Figure 1.4 – The propagation of the annular beam intensity

An annular beam can also be formed by subtracting two Gaussian beams of the same maximum intensity but with different beam waists. In this case, the resulting beam intensity would be:

$$I(r, \theta) = I_0 \left[ \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_1^2}\right) - \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_2^2}\right) \right] \quad (1.7)$$

where,  $\omega_1$  and  $\omega_2$  - correspond to beam waists of the two Gaussian beams.

Perhaps the most important optical property for materials processing is the extended depth of field of Bessel beams. This «non-diffracting» effect occurs as a result of minimal spreading in the central lobe during wave propagation.

Bessel beams exhibit a greater depth of field than Gaussian beams. In fact, the Rayleigh range for a Bessel beam can be approximated as:

$$z_{Bessel} \approx \frac{\pi D d_f}{4\lambda} \quad (1.8)$$

where  $D$  – is the diameter of the aperture,  
 $d_f$  – the diameter of the central lobe;  
 $\lambda$  – the laser wavelength.

Comparing Eq. 1.8 with the corresponding Rayleigh range of a Gaussian beam (Eq. 1.4), it can be observed that Bessel beams have a much larger Rayleigh range when  $D \gg d_f$ , as it is usually the case. Thus, Bessel beams exhibit a greater depth of field than Gaussian beams. The cost of this increased depth of field is that optical energy is distributed among the rings in the pattern and so the non-diffracting property of a Bessel beam comes at the expenses of power and contrast.

A second optical property of Bessel beams that is their ability to reconstruct after an obstruction in an effect that is commonly called «self-healing». This can be understood by considering the construction of a Bessel beam as a superposition of plane waves propagating on a cone. In this way, if an obstacle is placed in the center of the beam, it will block some of the rays, but others will interfere again after the obstruction and reform the beam. This unique property can help to mitigate effects of debris and other products of the laser processing that can partially block incident

beams. With conventional beams, such blocking can result in processing non-uniformities.

#### 1.4 Optical vortex beam

A related structure to the annular beam is the so-called optical vortex beam. An optical vortex beam takes advantage of this property and is defined as a beam whose phase varies azimuthally along the direction of propagation. Optical vortex beams are characterized by their topological charge  $l$ , which corresponds to the number of twists in the phase front within one wavelength. Due to the twisting of the phase front, the phase in the beam center is multiply defined, giving rise to an optical singularity that produces a vanishing amplitude at this point giving the appearance of an annulus in intensity.

Consider a radial laser array consisted of  $N$  identical fundamental Gaussian beams, which are located symmetrically on a ring with radius  $\rho$ , as illustrated in Fig. 1.5 a. Each beamlet is assumed to be symmetric with a waist width and different initial phase, and the displacement coordinates of each beamlet's center are  $(\rho \cdot \cos \theta_j, \rho \cdot \sin \theta_j)$ , where  $\theta_j = \frac{\pi \cdot (2j-1)}{N}$  is the azimuth angle of the  $j$ -th beamlet and  $\rho$  controls the separation distance  $d$  among these beamlets. Here, we consider that different beamlets should be weakly overlapped. The initial beam array is located at the input plane of  $z = 0$ , and propagates through an axially symmetric optical system (Fig. 1.5 b).

Here, we consider the radial beam array is combined with the identical fundamental Gaussian beams having different initial constant phases. During the propagation, each beamlet will interfere with each other, which induces the novel properties with the dark-intensity center, the rotation of the resultant beam and helical phase structure. All the beamlets are coherent-superposition.

The position of the vortex in the intensity distribution can be observed by studying the phase structure as follows: The change from  $0$  to  $2\pi$  around the point in-

indicates the screw type of the vortex and the phase overlapping the line indicates an edge dislocation.

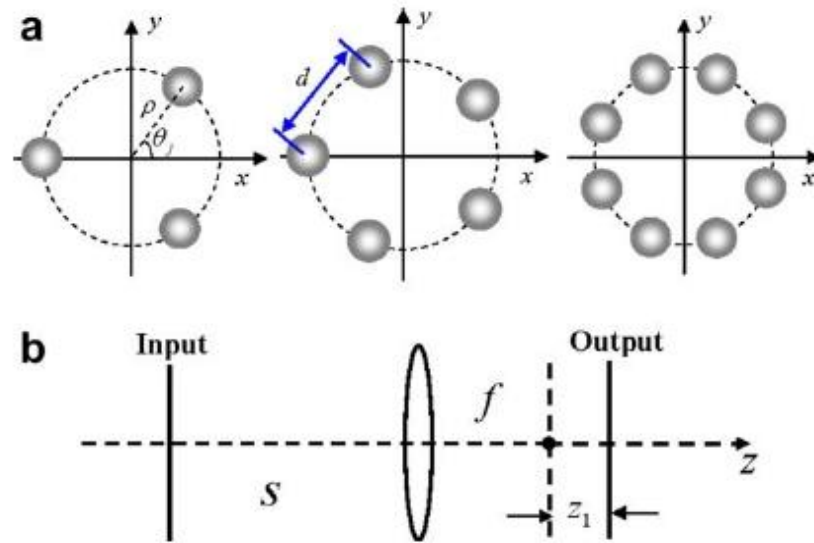


Figure 1.5 – Schematic of a radial laser arrays with  $N = 3, 5, 8$  identical fundamental Gaussian beams (a); Schematic of a focusing lens optical system(b)

Specifics of propagation of synthesized vortex beams will be considered on the basis of characteristics of the field of the Laguerre-Gaussian beam. Let us consider the peculiarities of the propagation of synthesized vortex beams on the basis of comparison with the characteristics of the field of the Laguerre-Gaussian beam  $LG_m^l$ :

$$E(r, \varphi, z=0) = \left( \sqrt{2} \frac{r}{a} \right)^l L_m^l \left( \frac{2r^2}{a^2} \right) \exp \left( -\frac{r^2}{a^2} \right) \exp(il\varphi) \quad (1.9)$$

where  $r$  и  $\varphi$  – polar coordinates;  
 $a$  – beam radius;  
 $m$  – radial mode index ( $m = 0$ );  
 $l$  – value of topological charge.

The field of the synthesized vortex beam is the sum of the fields on the sub-apertures of the fiber laser array:

$$E(x, y, z=0) = \sum_{sub=1}^{N_a} E_{sub}(x, y, z=0) \quad (1.10)$$

The central subbeam is absent in the case of hexagonal arrangement of the subbeams. The distributions of the amplitude and phase of the field of such a beam are shown in Fig. 1.6 for a topological charge  $l = 3$ .

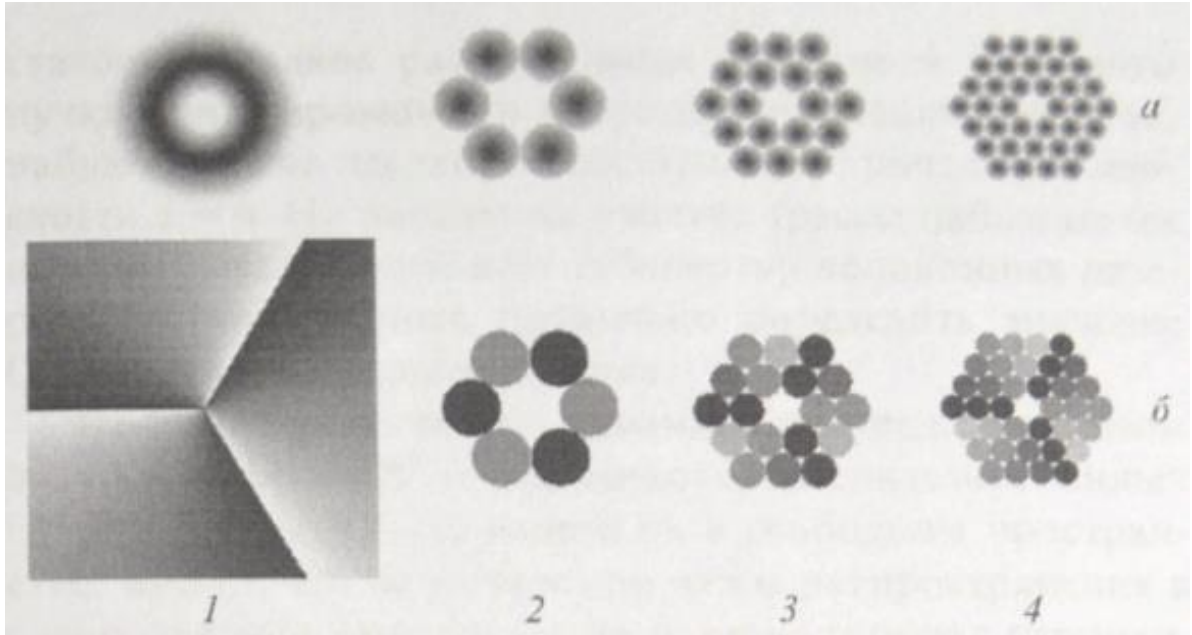


Figure 1.6 – The distributions of the amplitude (a) and phase of the field (b) for a topological charge  $l = 3$

It is seen that the number of subapertures constituting the synthesized vortex beam, similar to a continuous Laguerre-Gaussian beam, determines the radius of a separate subaperture. The number of subapertures also determines the maximum possible value of the topological charge.

## 2. Beam-combining techniques on laser arrays

Beam-combining techniques on laser arrays can be characterized in three broad classes, notionally illustrated in Fig. 1.7.

The first is side-by-side beam combining in which the array elements may (or may not) operate at the same wavelength, but nothing is done to try to control the relative spectra or phases of the elements. Conventional diode-laser arrays (linear bars and two-dimensional arrays) fall into this class. This class of beam combining is not addressed in this paper, as the radiance of these types of sources cannot be any greater than the radiance of a single array element.

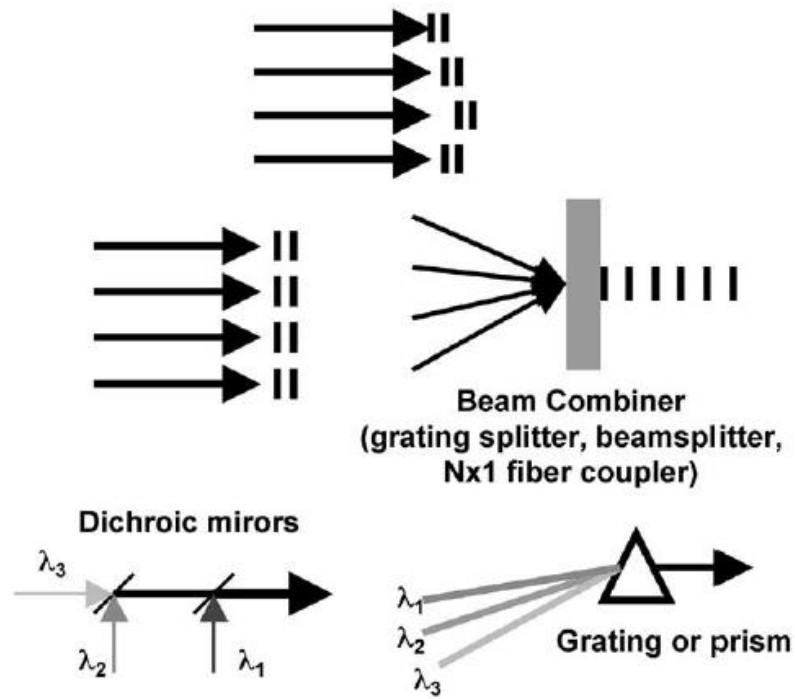


Figure 1.7 – Notional schematics of the broad classes of beam combining.

Side-by-side beam combining (top).

Coherent beam combining with tiled aperture implementations on the left and with filled-aperture implementations on the right (middle).

Wavelength beam combining using serial implementations on the left and parallel implementations on the right (bottom)

The next class is coherent beam combining or phased arrays in which all of the array elements operate with the same spectrum and the relative phases of the elements are controlled such that there is constructive interference. Historically, most of the effort to obtain good beam quality through laser beam combining has attempted to use this class of techniques. This is the analog of phased-array transmitters in the radio-frequency and microwave portions of the electromagnetic spectrum, but in the optical domain coherent beam combining has proven to be difficult because of the shortness of an optical wavelength. The phases of the array elements need to be controlled to a small fraction of a wavelength ( $2\pi$  phase); for the optical portion of the spectrum, the wavelength is on the order of  $1\ \mu m$ . Coherent beam combining has been demonstrated for small arrays, but identifying robust simple phased array approaches

for combining large arrays (tens to hundreds of elements) with nearly ideal beam quality has been elusive.

The last class is wavelength beam combining, in which the array elements operate at different wavelengths and then a dispersive optical system is used to overlap the beams from the elements in the near and far fields. Wavelength beam combining has also been used historically, but not nearly as often as coherent beam combining. Wavelength-division multiplexing in optical communications falls into this class, in which multiple wavelengths are put into a single-mode optical fiber.

Coherent beam combining and wavelength beam combining fundamentally impose different requirements on the output of the array elements because electric fields are vectorally summed in coherent beam combining, whereas in wavelength beam combining, powers are added. The fundamental requirements on array-element output for attaining ideal combining are summarized in Table 1.1.

Table 1.1 – Fundamental requirements for achieving ideal beam combining

| Property          | Wavelength beam combining                               | Coherent beam combining        |
|-------------------|---|--------------------------------|
| Power spectra     | non-overlapping   | same for all elements          |
| Phase control     | no requirement  | ideal control, mod $2\pi$      |
| Polarisation      | no requirement  | instantaneous relative control |
| Amplitude         | no requirement  | instantaneous relative control |
| Element alignment | diffraction limited alignment required for all elements |                                |

These fundamental requirements are independent of the exact implementation. However, in some specific implementations, it might be desirable for additional requirements to be levied against array-element characteristics. For example, in and wavelength beam combining, it might be desirable to have the elements have the same polarization because some optical components might be polarization sensitive; however this is an implementation-specific desire as opposed to a fundamental requirement. Clearly, coherent beam combining fundamentally imposes more requirements on element output than and wavelength beam combining.

Given that wavelength beam combining simply adds powers (i.e., is incoherent combining), it is easy to see why the fundamental requirements are relaxed. One

fundamental requirement is that the power spectra of the elements not overlap with each other. If there is an overlap in power spectra, for effective beam combining, phases would need to be controlled in the overlapping portion of the spectrum, which, of course, is coherent combining. In coherent beam combining, the electric fields of the elements must constructively add, which then imposes requirements that the polarizations must be controlled and the amplitudes of the elements must be controlled at every instant in time. The output power spectra need to be the same, and the phases need to have the correct relationships to constructively add. As element properties deviate from that listed in Table 1.1, the efficacy of beam combining decreases.

In the following we shall consider only systems with coherent beam combining.

### 3. The realization of a system with coherent beam combining

The methods of coherent beam combining can be divided into two main ones: a passive and active phase-locked. Feedback coupling serves to align the phases of optical elements. In the passive method, it is absent. In our work we will use the active method, so we will describe it in more detail.

Actively phase-locked coherent beam combining of  $N$  laser amplifiers seeded by a common master oscillator represents an engineer able approach toward scaling laser brightness  $B$  ( $B \sim BQ^2 \text{ power} / BQ^2$ ). That beyond the limits of the underlying single-element laser technology. Ideally, the combined output behaves as if it were a single beam, and  $B$  is thereby increased by a factor of  $N$  over an unphased array or by a factor of  $N^2$  over any individual laser. A weighty advantage of such a system is a small smaller power reduction in the event of failure of any gain element.

A canonical system-level architecture for a coherent beam combining laser array is shown in Fig. 1.8. A single master oscillator is split to seed a number of  $N$  channels. Each channel contains a piston phase actuator capable of imposing at least one wave of phase and a coherence-preserving laser amplifier (or a chain of amplifiers) to boost the channel power to the limit of the laser technology. The high-power



outputs from all  $N$  channels are geometrically combined either by using one or more beam splitters or by tiling side by side.

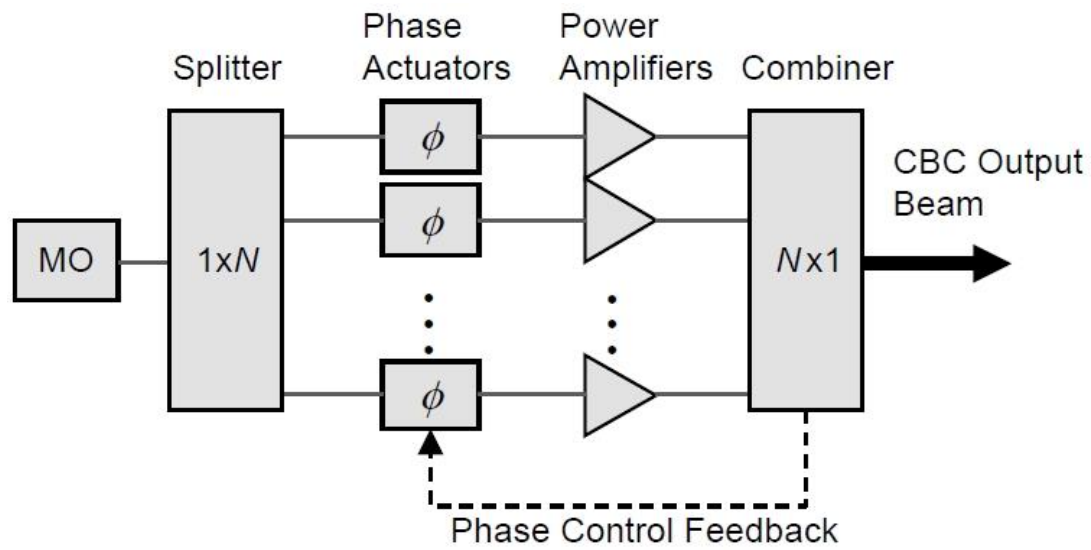


Figure 1.8 – System-level block diagram for an actively phase-locked coherent beam combining master oscillator power amplifier array

From Fig.1.8, we can identify three key technologies that must be integrated to form an actively phase-locked, coherently combined, high-power laser system:

- laser amplifiers, preserving coherence properties of a common master oscillator while providing high gain and high output power;
- optical system, geometrically overlapping the amplified beams in the far field and for some implementations, in the near field;
- active control systems, cophasing the amplified output beams via closed-loop feedback.

a) Master oscillator - power amplifier. The primary requirement for high-efficiency coherent beam combining is that the combined beams must be mutually coherent in both space and time to allow complete constructive interference. This means the lasers must be spatially mode-matched and coaligned, power-balanced, copolarized, path length matched, and locked in phase with high precision. When these requirements are not perfectly met, combining efficiency suffers.

b) Geometrically overlapping beams. As illustrated in Fig. 1.7, coherent beam combining implementations can be divided into two subsets characterized by the output formatting: tiled aperture and filled-aperture implementations.

In tiled-aperture implementations, individual elements have outputs that are adjacent to each other, and there is interference only in the far field. This type of implementation can be thought of as a synthesized plane wave. Clearly, to minimize side lobes and to obtain the maximum far-field intensity, the fill factor must approach unity (i.e., the spaces between tiles must be minimized).

In filled-aperture implementations, the interference occurs in the near field. The beam combiner in a filled-aperture system can be thought of as the inverse of a beamsplitter, and proper phase, amplitude, and polarization relations among the multiple beams must be maintained for efficient combining. Alternatively, in a fiber system, the beam combiner can be thought of as a splitter being run in reverse.

c) Active phase-locking controls. Much of the coherent beam combining research literature focuses exclusively on the means by which the lasers are locked in-phase modulo  $2\pi$ .

For a phase locking method to work successfully outside a laboratory environment, it must have an effective control bandwidth of multikilohertz to reject acoustically coupled phase noise and maintain root-mean-square phase stability between channels within  $1 \text{ rad}$ . Hence, the primary requirement in selecting the phase control method is that it can achieve high-speed and high locking fidelity for the appropriate number of channels  $N$ . The most successful phasing methods fall into three broad classes summarized in Table 1.2.

- OHD – optical heterodyne detection

In the OHD method, a reference beam derived from the master oscillator is frequency shifted by  $\Delta\omega$  upon passage through an acousto-optic modulator before being interferometrically combined with a low-power sample of the beam array using a beam splitter (Fig. 1.9). Within each individual beam footprint, a square-law photodetector senses the superimposed fields of the signal and reference beams and produces a time-dependent voltage

OHD can alternatively be implemented in the spatial domain by imposing a tilt (spatial frequency shift) between the signal and reference beams, leading to a spatial interference pattern.

Table 1.2 Comparison of the three major classes of active phase control loops for coherent beam combining

| Method  | OHD                             | Synchronous multidither (LOCSET) | Hill climbing (SPGD)                |
|---|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Channel count scaling, N  | No limit; fully parallel system | N = 32 demonstrated              | N~10 with ~10 kHz control bandwidth |
| No. of detectors needed   | N                               | 1                                | 1                                   |
| Control bandwidth   | >10 kHz                         | >10 kHz                          | Scales as $N^{-1}$                  |
| Piston set point identification   | Manual                          | Automatic                        | Automatic                           |
| Needs RF electronics?   | Yes                             | Yes                              | No                                  |
| Needs optical reference?  | Yes                             | No                               | No                                  |
| RMS phase errors  | $\lambda/80$                    | $\lambda/80$ (N = 32)            | $\lambda/40$ (N = 8)                |
| Shaded cells indicate disadvantages, either with excess system complexity or limited scaling capability |                                 |                                  |                                     |

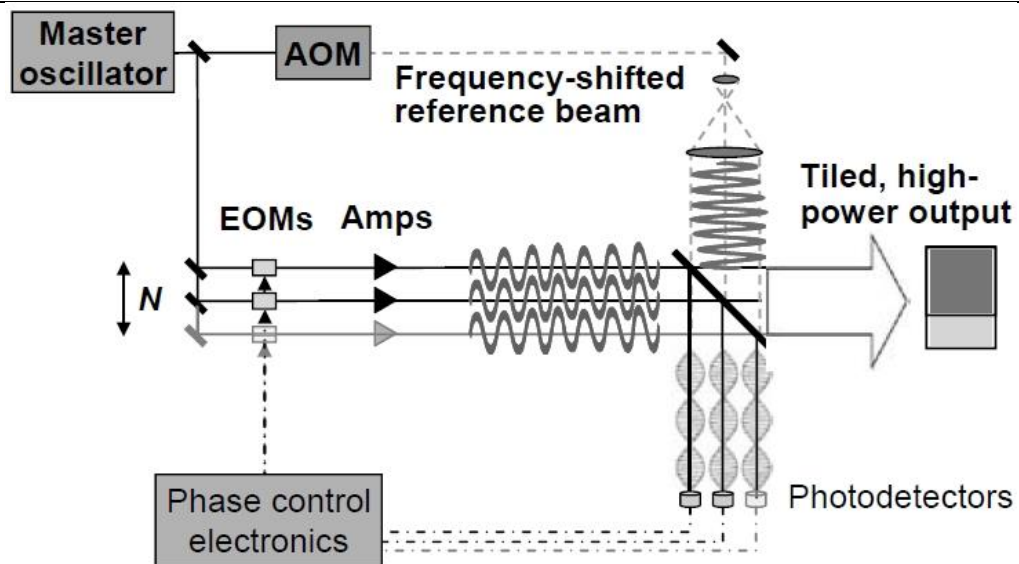


Figure 1.9 – Actively phase-located array of N lasers using the OHD method

It is apparent that the detector voltage consists of a direct current background modulated at the difference frequency owing to interference between the signal and reference beams. This sinusoidal beat waveforms squared up by passing it through a saturated amplifier and is then compared with a similar clock waveform derived from the radio-frequency drive voltage to the acousto-optic modulator. The time delay or phase difference between the edges of these two wave forms corresponds to the optical phase difference between the signal and reference beams. This error signal is then fed back to an electro-optic modulator located in the low-power front end of the cor-

responding amplifier chain to control its phase within a multiple of  $2\pi$ . In this manner, each beam is locked independently to the same phase as the reference beam and thus indirectly to one another.

The main benefit of the OHD phasing method is its scalability to large  $N$ . All beams are locked directly to a reference, not to each other. Hence, each beam's phase-locking behavior is independent of the presence or absence of other beams. In principle, there is no physical constraint on the number of beams that may be successfully combined.

Since the OHD approach requires one photodetector per beam, it tends to work best in the context of tiled array beam combiners where it is straightforward to overlay an expanded reference beam with a sample of the tiled composite output beam

One drawback of the OHD approach is its lack of a direct method to ensure all beams are locked to one another. Misalignments do not impact dynamic phase stabilization, but they do impose static phase errors between beams that must be removed via manual or automated set point adjustment.

- Synchronous multidither.

A class of phase locking methods that similar to OHD also utilizes heterodyne beats. In a multidither phasing system, each laser channel is «tagged» with a small ( $\ll 1 \text{ rad}$ ) phase dither applied at a unique frequency, typically by superimposing with the control voltage on the electro-optic modulator phase controller. A notable variant is the time sharing among channels of a single modulation frequency, with concurrent reduction in control bandwidth. A single detector that samples the combined output beam will exhibit a superposition of beats owing to interference between the various beams. Application of standard radio frequency demodulation techniques can extract unique error signals proportional to the phase error between each channel and the rest of the array. These error signals drive servo loops to cophase the beams.

The advantages of multidither are its utilization of a single detector for sensing the phase errors of an entire array and the avoidance of the phase set point ambiguity intrinsic to the OHD method. Minimization of the beat signals in the combined

beams corresponds to the condition where all beams are in-phase. The main disadvantage of multidither is its relative electronic complexity and cost, which has at present limited demonstrations to 32 channels despite clear potential for multihundred channel scalability based on signal-to-noise considerations.

- Hill Climbing

Perhaps the simplest methods for cophasing beams are to maximize the combined power in the far-field central lobe using hill climbing algorithms. Among which the most widely used is the stochastic parallel gradient descent (SPGD) method. In these approaches, the phases of the entire array of beams are simultaneously changed by small, statistically uncorrelated amounts, and the corresponding change in far-field power is sensed. The phase set points are then updated proportionally to the detected change in power, eventually arriving at the maximum power when all beams are in-phase.

Many variants of this class of methods are possible to optimize performance, but in general hill climbing methods suffer from limited scaling potential since for each added channel, an additional dimension in phase space must be dithered. Consequently, closed-loop bandwidths drop proportionately to  $1/N$ . Despite this limit, the avoidance of high-speed radio frequency electronics makes this control method relatively low cost and simple to implement using programmable computers. Hence, it is an attractive path for systems with either low channel counts ( $N \ll 100$ ) or low phase noise amplifiers that do not require high-speed phase control. Hill climbing variants with nested loops appear promising to bypass the scaling limitations at some increased cost of complexity.

- LOCSET – locking of optical coherence by single-detector electronic-frequency tagging

In order to coherently combine multiple lasers, accurate control of the optical phase is required. Similar to SPGD, LOCSET utilizes a single photodetector for active phase locking. However, LOCSET is not a stochastic. Based on coherent radio frequency demodulation, LOCSET electronics is capable of independently determining an error signal proportional to the optical phase difference of each beam meas-

ured with respect to every other beam in the array. Although LOCSET can only apply piston phase corrections, its excellent phase error performance at high channel counts (and high bandwidth) makes it attractive for active coherent beam combining. The LOCSET system is shown in Fig. 1.10.

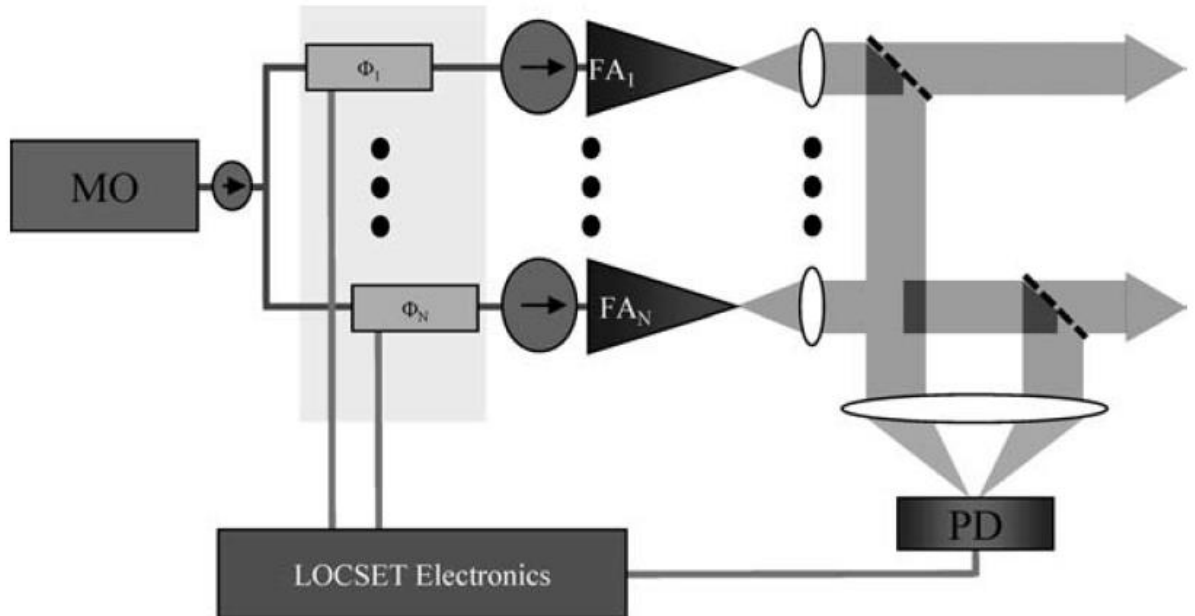


Figure 1.10 – LOCSET – method